

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Hinko Fuš**

Zagreb, 2018. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak, dipl. ing.

Student:

Hinko Fuš

Zagreb, 2018. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljaku i asistentu Mihi Klaiću koji su mi svojim znanjem i iskustvom pomogli kod izrade ovog rada.

Zahvaljujem se tvrtki Elektro-Kontakt d.d. na izradi ispitnog svrdla.

Posebno se zahvaljujem tvrtki VIST d.o.o. iz Čakovca i njenom vlasniku Ivanu Lovreku, kao stipenditoru, na financijskoj pomoći tijekom studija.

Također, zahvaljujem se svim svojim kolegama, prijateljima i prijateljicama, koji su uvijek bili tu uz mene i bez kojih cijeli tijek mog studiranja ne bi prošao tako lako i zabavno.

I na kraju, najveću zaslugu za ono što sam postigao pripisujem svojim roditeljima, koji su uvijek bili TU, uz mene, bez obzira da li se radilo o teškim ili sretnim trenucima i bez kojih sve ovo što sam dosad postigao ne bi bilo moguće.

Hinko Fuš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **INKO FUŠ** Mat. br.: **0035194558**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj odvođenja čestica na aksijalnu silu pri bušenju kamena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of chip evacuation on axial force at stone drilling**

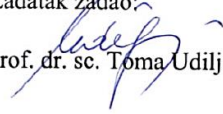
Opis zadatka:

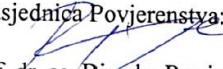
Prema dosadašnjim istraživanjima bušenja kamena provedenim u Laboratoriju za alatne strojeve utvrđeno je da promjenom dubine bušenja značajno raste aksijalna sila. Pretpostavka je da je razlog tome nemogućnost kvalitetnog odvođenja sitne odvojene čestice, što otežava proces formiranja čestice i povećava trenje. Kao posljedica je značajan porast aksijalne sile što najčešće rezultira puknućem obratka ili alata. U radu je potrebno modificirati komercijalno svrdlo s tvrdo lemljenom pločicom, koje se najčešće koristi kod bušenja kamena, kanalom za SHIP koji bi omogućio ispuhivanje i hlađenje reznih oštrica svrdla tijekom procesa bušenja. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je primijeniti tri brzine rezanja, tri posmaka i četiri stupnja istrošenosti svrdla. Eksperimente treba provesti na tri vrste kamena koji su raspoloživi u laboratoriju za alatne strojeve, a mjerenja za svako stanje pokusa treba ponoviti sedam puta. Kod provođenja pokusa snimat će se signali sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Istrošenost reznih oštrica svrdla utvrđivat će se, periodički nakon određenog broja provrta, industrijskom kamerom smještenom u radnom prostoru stroja. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:  
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:  
11. srpnja 2018.  
12. srpnja 2018.  
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Toma Udiljak

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Bušenje .....	2
1.2. Arhitektonsko – građevni kamen .....	8
2. SNAGA, MOMENTI I SILE KOD BUŠENJA .....	11
2.1. Snaga rezanja.....	11
2.2. Momenti i sile.....	14
3. TROŠENJE ALATA .....	17
3.1. Mehanizmi trošenja alata .....	18
3.1.1. Abrazija .....	20
3.1.2. Adhezija .....	22
3.1.3. Difuzija.....	23
3.1.4. Oksidacija (tribokorozija) .....	24
3.1.5. Umor površine.....	25
3.2. Oblici trošenja .....	26
3.2.1. Trošenje stražnje površine glavne rezne oštrice.....	27
3.2.2. Trošenje stražnje površine poprečne oštrice .....	28
3.2.3. Naljepak .....	28
3.2.4. Lom na glavnoj reznoj oštrici.....	29
3.2.5. Lom vrha rezne oštrice.....	30
3.2.6. Ostali oblici trošenja.....	30
3.3. Postojanost oštrice alata .....	32
3.4. Nadzor istrošenosti alata .....	36
4. SREDSTVO ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE .....	37
4.1. Uvjeti za pravilan izbor SHIP-a .....	37
4.2. Vrste .....	38
4.2.1. SHIP u obliku tekućine koji se ne miješa s vodom .....	39
4.2.2. SHIP u obliku tekućine koji se miješa s vodom.....	40
4.3. Način dovođenja.....	41
4.3.1. Uljna magla .....	42
4.3.2. Suha obrada .....	44
4.4. Važnost SHIP-a kod bušenja kamena .....	45
5. ELEKTRO-EROZIJSKA OBRADA ŽIGOM .....	47
5.1. Princip rada .....	47
5.2. Dielektrična tekućina, Alat.....	48
5.3. Karakteristike obrade i primjena .....	50

6. ESKPERIMENTALNI POSTAV .....	51
6.1. Konstrukcija stroja .....	51
6.2. CNC sustav .....	53
6.3 Mjerni sustavi .....	53
6.4. Korisničko sučelje mjernog sustava .....	58
7. EKSPERIMENT .....	60
7.1. Planiranje pokusa .....	60
7.2. Mjerenje i analiza rezultata .....	65
7.2.1. Istrošenost svrdla .....	65
7.2.2. Sile rezanja i jakost struja pogonskih motora .....	72
8. ZAKLJUČAK .....	86
LITERATURA .....	87

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Primjena kamena u kamenom dobu [1].....	1
Slika 2.	Shematski prikaz svrdla [3].....	2
Slika 3.	Vrste svrdla [3].....	2
Slika 4.	Kinematika kod bušenja .....	3
Slika 5.	Bušenje u puni materijal [3] .....	4
Slika 6.	Promjena kuta prednje površine [3] .....	5
Slika 7.	Formiranje odvojene čestice prilikom različitih kuteva prednje površine [3].....	6
Slika 8.	Specijalne izvedbe vrha svrdla [3] .....	7
Slika 9.	Primjeri kamena [6].....	8
Slika 10.	Oprema za ispitivanje tvrdoće po Mohs-u [7].....	9
Slika 11.	Oblik indentora i otiska Knoop-ove metode [27].....	10
Slika 12.	Fizikalni parametri kod tokarenje i bušenja [3].....	11
Slika 13.	Sile rezanja kod tokarenja [3].....	12
Slika 14.	Proširivanje provrta i bušenje u puno [3] .....	13
Slika 15.	Geometrija odvojene čestice te sile kod bušenja [3] .....	14
Slika 16.	Opterećenje na glavnoj reznoj i poprečnoj oštrici [3] .....	15
Slika 17.	Površina alata vidljiva (a) golim okom i (b) pomoću mikroskopa.....	17
Slika 18.	Primjeri relativnih gibanja između tijela u kontaktu i pripadajući procesi trošenja [12] .....	18
Slika 19.	Udjeli mehanizama trošenja u ukupnom trošenju ovisno o temperaturi [2] .....	19
Slika 20.	Mehanizmi trošenja na alatu tijekom obrade [2].....	19
Slika 21.	Abrazijsko trošenje [11] .....	20
Slika 22.	Tribosustav abrazije .....	20
Slika 23.	Primjer abrazijskog trošenja [13] .....	21
Slika 24.	Adhezijsko trošenje [11] .....	22
Slika 25.	Primjer adhezijskog trošenja [14].....	23
Slika 26.	Difuzija [15] .....	23
Slika 27.	Primjer difuzijskog trošenja [14].....	24
Slika 28.	Oksidacija [11] .....	24
Slika 29.	Primjer oksidacijskog trošenja [14].....	25
Slika 30.	Umor površine [11] .....	25
Slika 31.	Izgled površine oštećene umorom površine [11] .....	26
Slika 32.	Uobičajeni položaji oblika trošenja reznih alata [2].....	26
Slika 33.	Trošenje stražnje površine [17] .....	27
Slika 34.	Parametri trošenja kod trošenja stražnje površine [18] .....	27
Slika 35.	Trošenje stražnje površine poprečne oštrice [17].....	28
Slika 36.	Naljepak [17] .....	28
Slika 37.	Utjecaj brzine rezanja na mjesto nastanka naljepka [17] .....	29
Slika 38.	Lom na glavnoj reznoj oštrici [17] .....	29
Slika 39.	Lom vrha rezne oštrice [17] .....	30
Slika 40.	Plastična deformacija [17].....	30
Slika 41.	Toplinska napuknuća [17] .....	30
Slika 42.	Trošenje pomoćne rezne oštrice [17] .....	31
Slika 43.	Lom svrdla [17] .....	31
Slika 44.	Tipska krivulja trošenja reznih alata [3].....	32
Slika 45.	Utjecaj parametara obrade na iznos trošenja i temperaturu rezanja [19] .....	33
Slika 46.	Tipske krivulje trošenja (a), ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja (b) [20] .....	33

Slika 47.	Grafički prikaz Taylor-ove jednadžbe.....	34
Slika 48.	Grafički prikaz Taylor-ove jednadžbe za postojanost definiranu duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja.....	35
Slika 49.	Potreba za hlađenjem ili podmazivanjem kod različitih postupaka obrade odvajanjem [3].....	38
Slika 50.	Pjenjenje kod mineralnih i sintetičkih ulja [21] .....	39
Slika 51.	Emulzija [22] .....	40
Slika 52.	Način dovođenja SHIP-a [2] .....	41
Slika 53.	Primjer svrdla koje ima mogućnost dobave SHIP-a kroz sam alat [3] .....	42
Slika 54.	Raspršivač [23].....	43
Slika 55.	Primjer svrdla s vlastitim hlađenjem [24] .....	44
Slika 56.	Shematski prikaz toplinske cijevi [24] .....	45
Slika 57.	Odnos sile rezanja i dubine prilikom bušenja pješčenjaka [25] .....	46
Slika 58.	Odnos sile rezanja o dubini bušenja uz uključivanje komprimiranog zraka na dubini od 12 mm [26].....	46
Slika 59.	Princip elektroerozijske obrade žigom [2] .....	48
Slika 60.	Izgled obrađene površine dobivene postupkom EDM-a [29] .....	50
Slika 61.	Eksperimentalni postav [27].....	51
Slika 62.	Unutrašnjoj stroja .....	52
Slika 63.	Elementi upravljačkog sustava eksperimentalnog postava [27].....	53
Slika 64.	Smještaj senzora sile i industrijske kamere .....	54
Slika 65.	Prijenosna modularna mjerna stanica.....	54
Slika 66.	Senzor sile rezanja i nabojno pojačalo .....	55
Slika 67.	Shema kompletne strukture mjernog sustava .....	58
Slika 68.	Korisničko sučelje mjerene aplikacije LabView .....	59
Slika 69.	Primjer naziva datoteke nakon završetka obrade .....	59
Slika 70.	Kameni uzorci .....	60
Slika 71.	Shematski prikaz vrha svrdla s kanalima za prolaz SHIP-a.....	61
Slika 72.	Problem paralelnosti svrdla i elektrode .....	62
Slika 73.	Ispitno svrdlo.....	62
Slika 74.	Dijagram toka izvođenja eksperimenta .....	64
Slika 75.	Shematski prikaz stražnje površine svrdla i parametri trošenja .....	65
Slika 76.	Primjer naziva slike kod mjerenja istrošenosti.....	65
Slika 77.	Primjena programskog paketa CATIA kod određivanja parametara trošenja .....	68
Slika 78.	Usporedba parametara trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a 1 .....	70
Slika 79.	Usporedba parametara trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a 2 .....	70
Slika 80.	Usporedba površina zone trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a .....	71
Slika 81.	Izgled stražnje površine svrdla nakon izbušenih 3756 provrta .....	71
Slika 82.	Usporedba aksijalnih sila $F_z$ dobivenih prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a 1 .....	76
Slika 83.	Usporedba aksijalnih sila $F_z$ dobivenih prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a 2 .....	77
Slika 84.	Usporedba jakosti struja pogonskog motora osi Z dobivenih prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a .....	80
Slika 85.	Srednje vrijednosti jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena.....	84



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci primjene uljne magle.....	43
Tablica 2. Prednosti i nedostaci EDM-a.....	47
Tablica 3. Materijali za izradu alata/elektrode s pripadajućim karakteristikama [28] .....	49
Tablica 4. Osnovne tehničke karakteristike stroja.....	52
Tablica 5. Tehničke karakteristike senzora sila (tip 9257B, Kistler AG) [30].....	55
Tablica 6. Tehničke karakteristike nabojnog pojačala (tip 5017B, Kistler AG) [31] .....	56
Tablica 7. Tehničke karakteristike vizijskoj sustava.....	57
Tablica 8. Mehanička svojstva ispitnih uzoraka [27] .....	61
Tablica 9. Režimi obrade.....	63
Tablica 10. Početno i konačno stanje stražnje površine oštice 1 za svaki stupanj istrošenja .	66
Tablica 11. Početno i konačno stanje stražnje površine oštice 2 za svaki stupanj istrošenja .	67
Tablica 12. Iznos parametara trošenja s obzirom na stupanj istrošenosti .....	69
Tablica 13. Nefiltrirani i filtrirani signali sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora .....	72
Tablica 14. Aritmetičke sredine aksijalnih sila $F_z$ prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a.	74
Tablica 15. Smanjenje aksijalne sile $F_z$ upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a	75
Tablica 16. Srednja vrijednost aksijalnih sila $F_z$ za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti.....	77
Tablica 17. Aritmetičke sredine jakosti struja pogonskog motora osi $Z$ ( $I_z$ ).....	78
Tablica 18. Smanjenje jakosti struja pogonskog motora osi $Z$ ( $I_z$ ) upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a .....	79
Tablica 19. Srednja vrijednost jakosti struja pogonskog motora osi $Z$ za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti.....	81
Tablica 20. Aritmetičke sredine jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) .....	82
Tablica 21. Smanjenje jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a .....	83
Tablica 22. Srednja vrijednost jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti.....	84

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$v_c$	m/min	brzina rezanja
$f_z$	mm/zubu	posmak po zubu
$n_t$	min <sup>-1</sup>	učestalost vrtnje
$r$	m	promjer svrdla
$v_f$	mm/min	posmična brzina
$z$	-	broj zubi svrdla
$Q_w$	mm <sup>3</sup> /h	proizvodnost
$f$	mm	posmak
$\delta$	°	kut spirale
$\gamma$	°	kut prednje površine
$\gamma_h$	°	kut prednje površine glavne rezne oštrice
$\gamma_q$	°	kut prednje površine poprečne oštrice
$\sigma$	°	kut vrha svrdla
$r_q$	mm	polumjer jezgre svrdla
$r_a$	mm	polumjer svrdla
$\alpha$	°	stražnji kut
$\alpha_{\min}$	°	minimalan iznos stražnjeg kuta
$F_R$	N	rezultanta sila rezanja
$F_c$	N	glavna sila rezanja
$F_f$	N	posmična sila rezanja
$F_p$	N	natražna sila rezanja
$A$	mm <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka nedeformirane odvojene čestice
$k_c$	N	specifična glavna sila rezanja
$a_p$	mm	dubina rezanja
$b$	mm	geometrijski parametar
$h$	mm	geometrijski parametar
$\beta$	°	kut klina
$\mu$	—	faktor trenja
$k_{c0}$	N	specifična glavna sila rezanja u slučaju referentnih vrijednosti utjecajnih faktora
$\psi_0$	—	bezdimenzijska funkcija koja uključuje utjecaj utjecajnih parametara na promjenu glavne sile rezanja
$h_0$	mm	referentni geometrijski parametar ( $h_0 = 1$ mm)
$k_{c1,1}$	N	specifična glavna sila rezanja za $h = b = 1$ mm
$m_c$	—	konstanta koja uvećava iznos specifične sile rezanja ovisno o utjecajnim parametrima
$h_x$	mm	debljina nedeformirane odvojene čestice

$k_{c1,x}$	N	specifična glavna sila rezanja za stvarnu debljinu nedeformirane odvojene čestice
$P_{ch}$	W	snaga rezanja kod tokarenja
$P_{cq}$	W	komponenta snage rezanja koja uzima u obzir utjecaj poprečne oštrice na proces obrade
$P_c$	W	snaga rezanja (kod bušenja)
$M_{ch}$	Nm	rezní moment na glavnim reznim oštricama
$M_{cq}$	Nm	rezní moment na poprečnoj oštrici
$t_c$	—	omjer $M_{ch}/M_{cq}$
$p_c$	N/mm <sup>2</sup>	režno opterećenje
$p_f$	N/mm <sup>2</sup>	posmično opterećenje
$M_c$	Nm	moment bušenja
$p_{ch}$	N/mm <sup>2</sup>	režno opterećenje na glavnim reznim oštricama
$p_{cq}$	N/mm <sup>2</sup>	režno opterećenje na poprečnoj oštrici
$s_c$	—	omjer $p_{cq}/p_{ch}$
$q$	—	omjer polumjera $r_q/r_a$
$r_c$	mm	efektivni polumjer svrdla
$p_{fh}$	N/mm <sup>2</sup>	posmično opterećenje na glavnim reznim oštricama
$p_{fq}$	N/mm <sup>2</sup>	posmično opterećenje na poprečnoj oštrici
$s_f$	—	omjer $p_{fq}/p_{fh}$
$r_i$	mm	polumjer provrta predbušenja
$F_N$	N	normalna komponenta opterećenja
$F_t$	N	tangencijalna komponenta opterećenja
$VB$	mm	iznost trošenja stražnje površine alata
$VB_{max}$	mm	maksimalno dopušteni iznos trošenja stražnje površine alata
$t$	s	vrijeme obrade
$T$	min	vijek trajanja alata
$C_T$	—	Taylor-ova konstanta
$m, x, y, z$	—	eksponent Taylor-ove jednadžbe
$L_f$	m	duljina puta u smjeru posmičnog gibanja
$D$	mm	promjer svrdla
$m_f$	—	Taylor-ov eksponent
$C_{L_f}$	—	Taylor-ova konstanta
SV	—	pješčenjak – vrsta kamena
SHIP	—	sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
EDM	—	elektroerozijska obrada žigom
$F_z$	N	aksijalna sila u osi Z
$I_z$	A	jakost struje pogonskog motora osi Z
$I_{gv}$	A	jakost struje pogonskog motora glavnog vretena

## SAŽETAK

Danas se najveći udio u postupcima obrade odvajanjem odnosi na obradu metala. U isto vrijeme, sve se više potiču istraživanja i razvoj tehnologije obrade nehomogenih materijala poput kamena i kompozita. Svojstva kod nehomogenih materijala nisu jednaka po cijelom volumenu promatranog dijela. Navedeni problem utječe na proces obrade te na samo trošenje alata.

Na samom početku teorijskog dijela rada biti će objašnjen postupak izračuna snage, momenata i sila kod bušenja. Biti će prikazani mehanizmi i oblici trošenja alata koji se mogu pojaviti zbog različitih uvjeta u kojima se nalazi alat tijekom obrade. Opisat će se Taylor-ov model trošenja alata, zatim kako se definira postojanost oštrice alata, odnosno životni vijek alata i koji od modela se primjenjuje kod postupka bušenja. Objasniti će se koja je svrha sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) te koje sve vrste i načini dovodenja postoje. Na kraju teorijskog dijela biti će objašnjen postupak elektro-erozijske obrade žigom koji je potreban kod modifikacije komercijalnog svrdla za provedbu eksperimenta.

U eksperimentalnom dijelu, objašnjen je postupak modifikacije komercijalnog svrdla s tvrdo lemljenom pločicom, na način da se kroz svrdlo izradi kanal koji omogućava ispuhivanje i hlađenje reznih oštrica svrdla tijekom procesa bušenja. Provodit će se bušenje različitih vrsta kamena s različitim parametrima obrade i stupnjem istrošenosti svrdla. Tijekom bušenja koristit će se komprimirani zrak za ispuhivanje i hlađenje reznih oštrica svrdla. Kod provođenja pokusa snimat će se signali sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora te će se prema planu eksperimenta vršiti snimanje stražnje površine svrdla pomoću industrijske kamere. Na kraju će se usporediti dobiveni rezultati s rezultatima bušenja kamena bez upotrebe SHIP-a.

Ključne riječi: bušenje, kamen, trošenje, svrdlo, elektroerozija, ispuhivanje, SHIP, sile rezanja

## SUMMARY

Today, the largest share in machining processes refers to metalworking. At the same time, working technologies of non-homogeneous materials such as stone and composites are increasingly being explored. The properties of non-homogeneous materials are not equal through the entire volume of the observed body and that problem affects the working process and the tool wear.

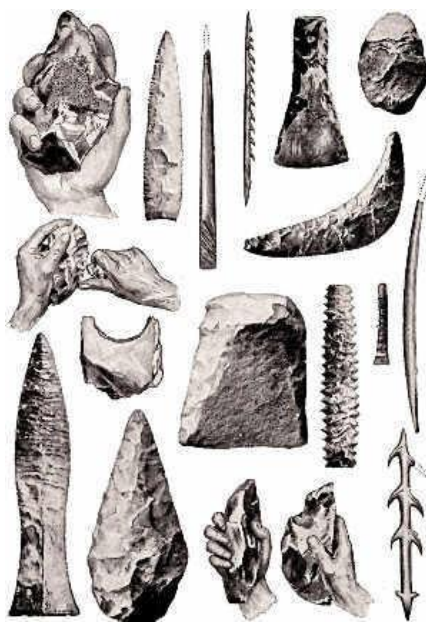
In the first part of this paper, the methods of calculation of powers, moments, and forces at drilling will be explained. The mechanisms and different types of tool wear that may occur due to the different cutting conditions in which the tool is located during cutting process will be displayed. Taylor's model of tool wear and how the tool life is defined will be described. The purpose of cutting fluids (cooling lubrication fluid, coolant), which types and ways of bringing the coolant exist will be shown. At the end of first part, the Sinker Electrical Discharge Machining (Sinker EDM, Ram EDM) process, which is needed for modifying a commercial drill bit for experiment, will be explained.

The experimental section of this paper explains the method of modifying a commercial drill bit with a hard solder plate, in such way that through the drill a channel is created which allows the flow of cutting fluids during drilling. Drilling of different types of stones will be carried out with different process parameters and the different degree of tool wear. Compressed air will be used during drilling to help extract a chip from the inside of the bore and cool the cutting edge of drill bit. During the experiment, the signals of cutting forces and the current of the drive motors will be recorded. Also, according to the plan of the experiment, the flank face of drill bit will be photographed using an industrial camera. At the end, the obtained results will be compared with the results of the same drilling processes carried out without using a compressed air as cutting fluid.

Key words: drilling, stone, tool wear, EDM, coolant, compressed air, cutting force

## 1. UVOD

Ljudi od pamtivijeka imaju potrebu olakšati svoj svakodnevni život. Tako su još *Homo sapiens* [1], oko 35 000. godine prije Krista, otkrili prednosti primjene rotacijskih alata. Koristili su primitivan oštar kamen kako bi napravili provrt u nekom drugom materijalu. Osim kao alat, kamen su koristili kao nakit, zatim oružje (Slika 1.) koje je omogućavalo nabavu hrane te kao građevni materijal koji ih je štitio od vremenskih uvjeta pa i divljih životinja.



**Slika 1. Primjena kamena u kamenom dobu [1]**

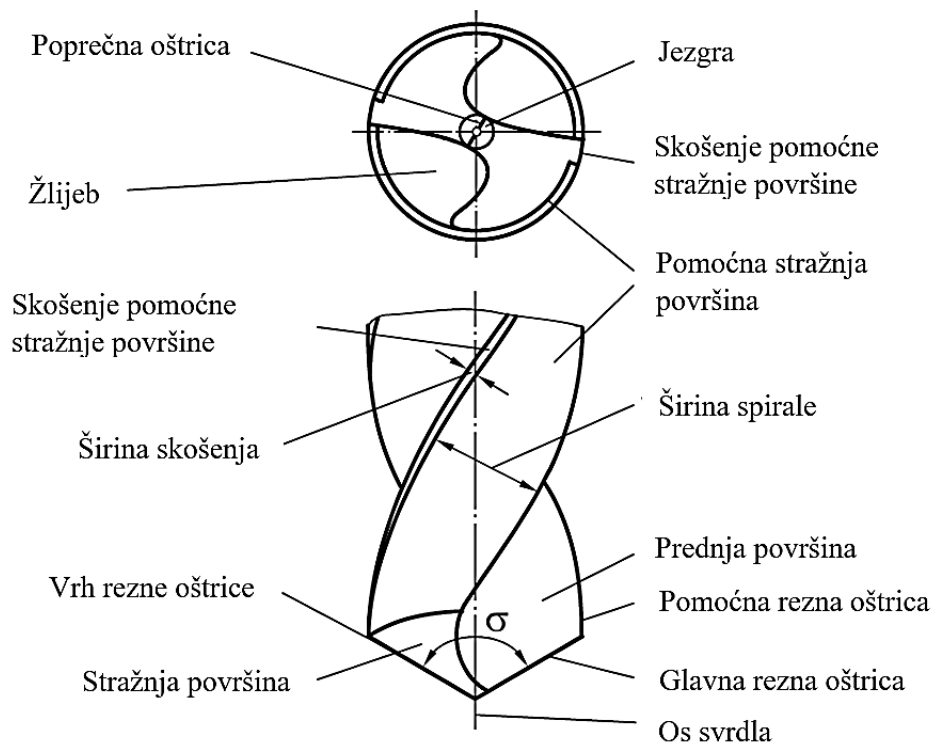
S vremenom, kako su otkriveni novi materijali, ponajviše željezo, dolazi do sve bržeg razvoja civilizacije. Tako su se počeli izrađivati željezni alati i oružje, dok se kamen počinje upotrebljavati u raznim vjerskim odnosno kulturnim svrhama kod izrade kipova i skulptura.

Danas se najveći udio u postupcima obrade odvajanjem odnosi na obradu metala. U isto vrijeme, sve se više potiču istraživanja i razvoj tehnologije obrade nehomogenih materijala poput kamena i kompozita. Svojstva kod nehomogenih materijala nisu jednaka po cijelom volumenu promatranog dijela. Taj problem utječe na proces obrade te na samo trošenje alata. U sklopu ovog diplomskog rada bit će stavljen naglasak na utjecaj odvođenja odvojenih čestica na trošenje svrdla kod bušenja kamena.

U sljedećim potpoglavljima dane su osnovne informacije o samom procesu bušenja te o kamenu kao materijalu obrade s ciljem što lakšeg razumijevanja sljedećih poglavlja.

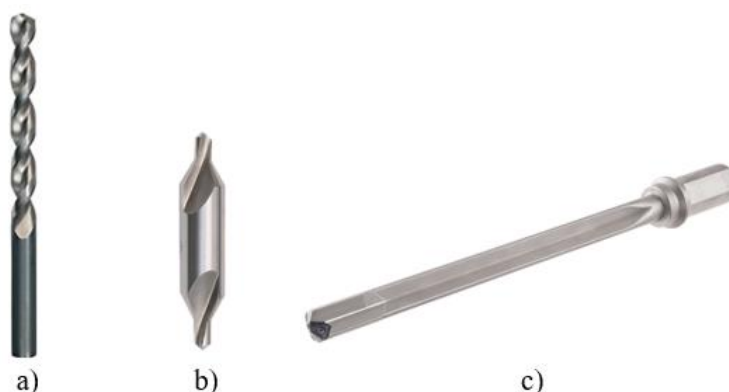
## 1.1. Bušenje

Bušenje je, prema [2], postupak obrade odvajanjem čestica koji se upotrebljava za izradu provrta ( $5 \dots 10$  mm) i proširivanje provrta većih promjera. Izvodi se na alatnim strojevima, pretežno bušilicama. Alat je definirane geometrije rezne oštrice te se naziva svrdlo. Svrdlo, prikazano na slici 2. ima najčešće dvije glavne rezne oštrice i jednu poprečnu oštricu.



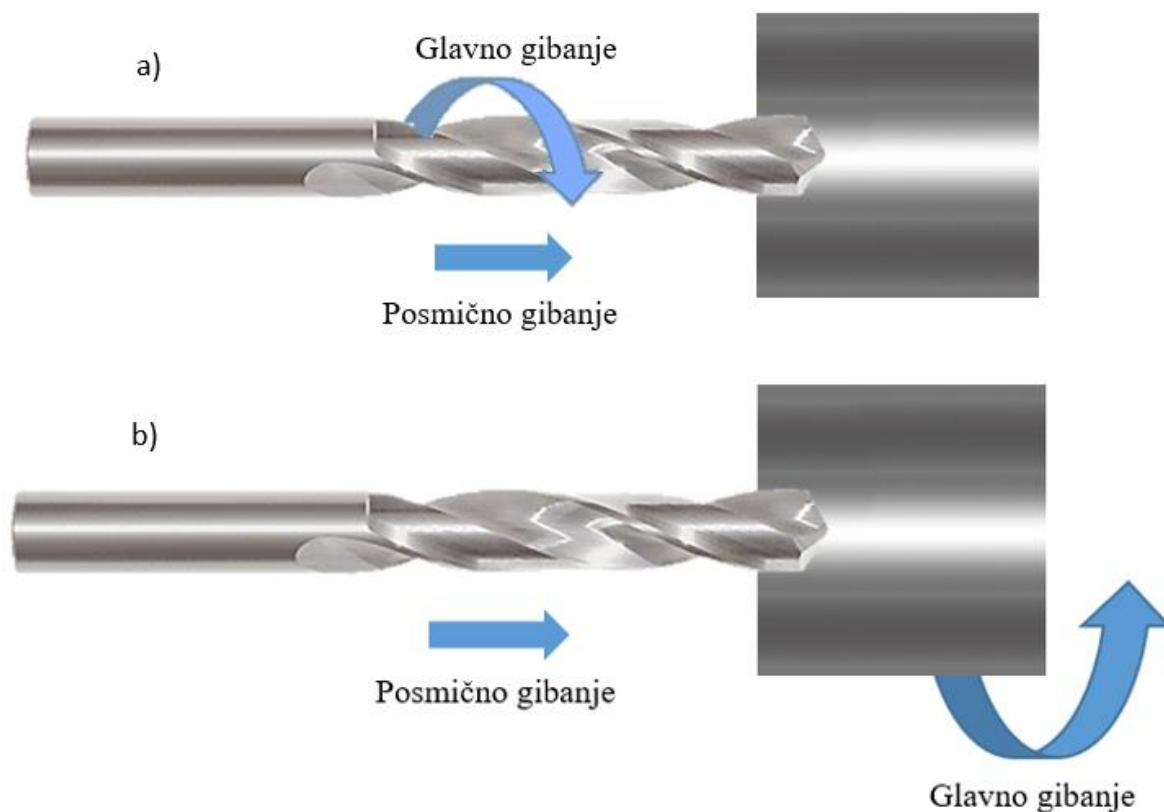
**Slika 2. Shematski prikaz svrdla [3]**

Svrdla se dijele na: spiralna svrdla (slika 3a.), svrdla za središnje uvrte (slika 3b.) te svrdla za duboko bušenje (slika 3c.).



**Slika 3. Vrste svrdla [3]**

Glavno gibanje je kružno kontinuirano, a posmično gibanje pravolinijsko kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje. Ako se obrada izvodi na bušilicama sva gibanja izvodi alat. Na slici 4a. prikazana je kinematika bušenja na bušilici, a na slici 4b. je prikazana kinematika bušenja na tokarilici.



**Slika 4. Kinematika kod bušenja**

Karakteristike bušenja:

- Brzina rezanja ovisi o polumjeru svrdla – u središnjoj osi svrdla iznosi nula te se proporcionalno povećava s polumjerom
- Otežano odvođenje odvojene čestice
- Otežano dovođenje sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) s povećanjem dubine – moguća potreba za korištenjem specijalnih svrdla s mogućnošću dobave SHIP-a kroz samo svrdlo
- Za svaki promjer provrta je potrebno zasebno svrdlo



Postoje dva ključna parametra kod obrade bušenjem, a to su: brzina rezanja  $v_c$  te posmak po oštrici  $f_z$ . Brzina rezanja je ograničena vrstom materijala reznih oštrica, dok se povećanjem posmaka po oštrici ostvaruje veća površina presjeka odvojene čestice te to rezultira i većim opterećenjem. Pomoću gore navedenih parametara mogu se izračunati učestalost vrtnje  $n_t$  te posmična brzina  $v_f$ :

$$n_t = \frac{v_c}{2 \cdot r \cdot \pi} \quad (1.1)$$

$$v_f = z \cdot f_z \cdot n_t \quad (1.2)$$

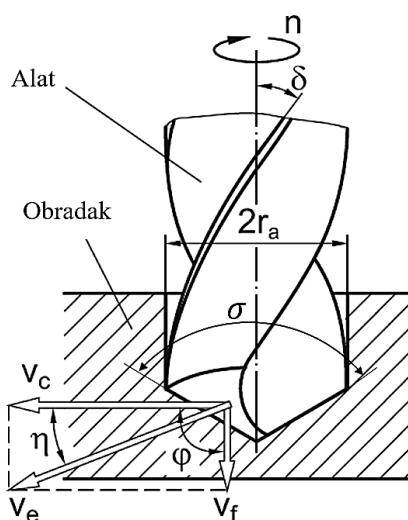
gdje je  $r$  polumjer svrdla, a  $z$  broj glavnih reznih oštrica.

Općenito, spiralno svrdlo ima dvije glavne rezne oštrice  $z = 2$ . U tom slučaju proizvodnost (volumen odvojenog materijala), prilikom bušenja u puni materijal (slika 5.) iznosi:

$$Q_w = \frac{1}{2} r \cdot f \cdot v_c \quad (1.3)$$

gdje je posmak svrdla  $f$ :

$$f = z \cdot f_z \quad (1.4)$$



**Slika 5. Bušenje u puni materijal [3]**

Kut spirale  $\delta$  utječe na sam proces formiranja odvojene čestice. Veći iznos kuta koristi se kod obrade mekih materijala kod kojih je odvojena čestica duža (omogućuje trganje odvojene čestice), dok se manji iznosi koriste kod obrade tvrdih materijala kod kojih je odvojena čestica kraća. Također kut spirale utječe i na kut prednje površine  $\gamma$  (prikazano na slici 6.). Kut prednje površine ima značajan utjecaj na sile rezanja. Kut prednje površine glavne rezne oštrice označava se s  $\gamma_h$  dok se kut prednje površine poprečne oštrice označava  $\gamma_q$ .

U neposrednoj blizini središta svrdla, kut prednje površine poprečne oštrice je negativan i iznosi  $\gamma_q = -\sigma/2$ , gdje je  $\sigma$  kut vrha svrdla.

Udaljavanjem od središta uzduž poprečne oštrice, kut prednje površine se blago povećava, ali ostaje unutar sljedećih granica:

$$-\frac{\sigma}{2} \leq \gamma \leq -\left(1 - \frac{r_q}{r_a}\right) \cdot \frac{\sigma}{2} \quad (1.5)$$

gdje je  $r_q$  polumjer jezgre svrdla, a  $r_a$  polumjer svrdla.

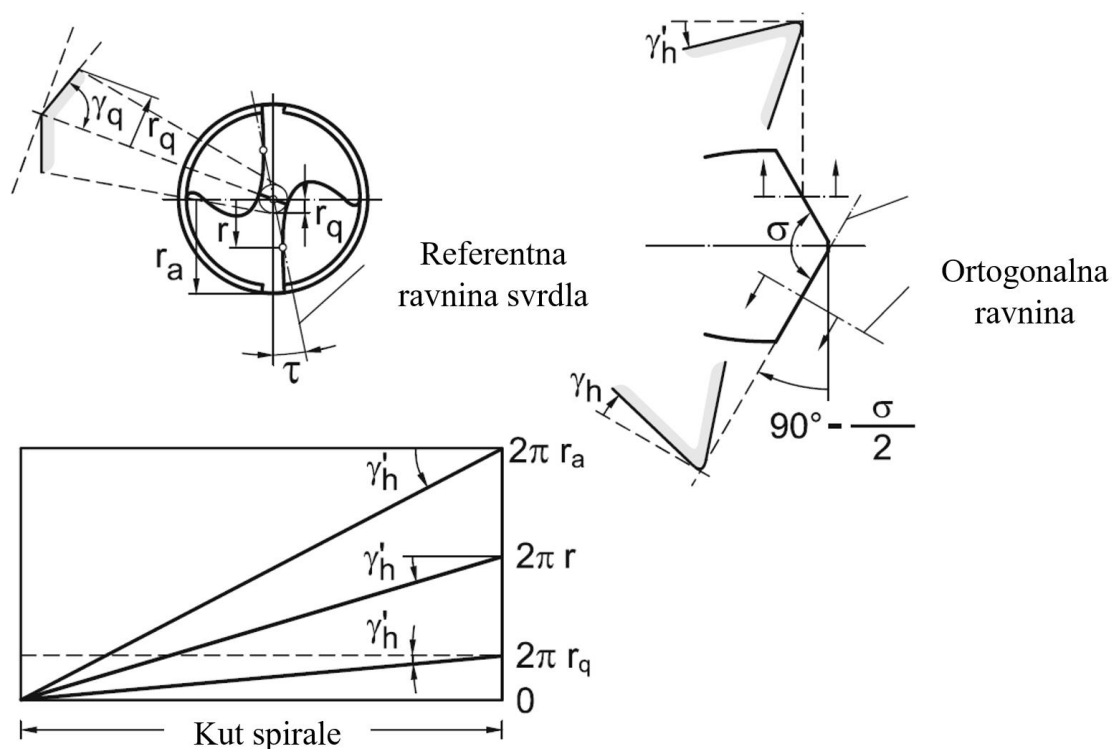
Kut prednje površine glavne rezne oštrice na vanjskom rubu svrdla ( $r = r_a$ ) iznosi:

$$\gamma_h(r = r_a) = \arctan \frac{\tan \delta}{\sin \frac{\sigma}{2}} \quad (1.6)$$

gdje je  $\delta$  kut spirale.

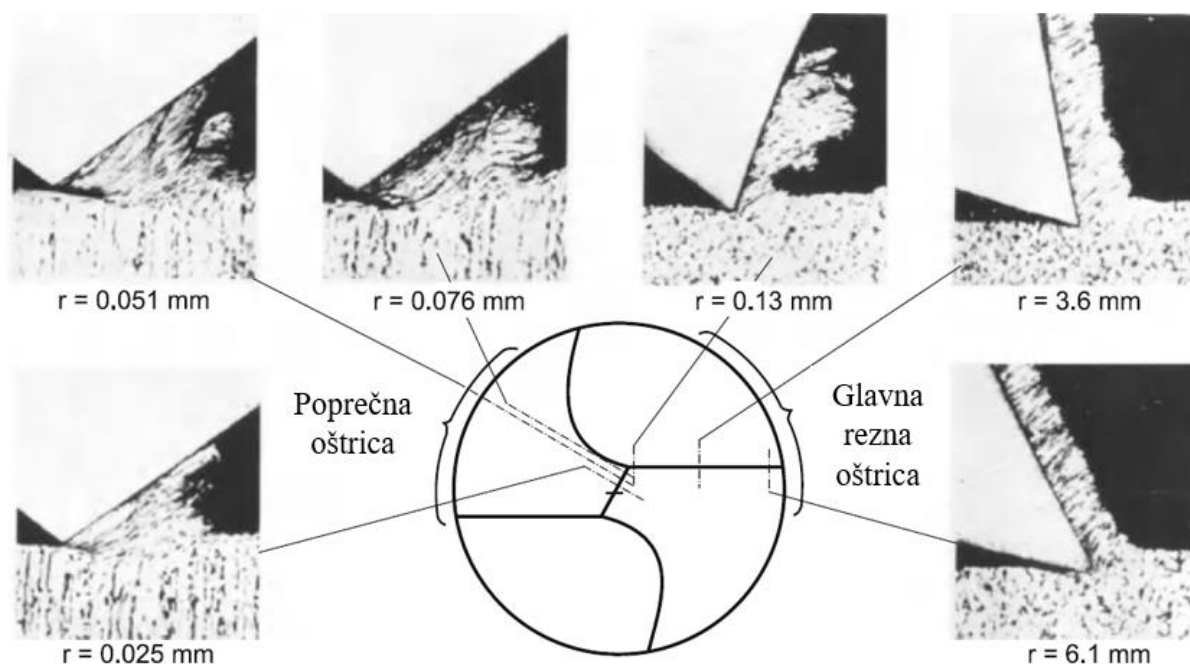
Približavanjem ka središtu svrdla mijenja se prema sljedećem načelu:

$$\gamma_h = \arctan \left( \frac{r \tan \delta}{r_a \sin \frac{\sigma}{2}} \right) \quad (1.7)$$



Slika 6. Promjena kuta prednje površine [3]

Na slici 7. je prikazano formiranje odvojene čestice prilikom različitih kuteva prednje površine glavne rezne i poprečne oštrice. Vidljivo je kako pri malim vrijednostima polumjera  $r$  dolazi do gnječenja umjesto rezanja materijala.



**Slika 7. Formiranje odvojene čestice prilikom različitih kuteva prednje površine [3]**

Na proces rezanja materijala utječe i stražnji kut  $\alpha$ . Minimalni iznos stražnjeg kuta može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$\tan \alpha_{min} = \frac{v_f}{v_c} \cdot \sin \frac{\sigma}{2} = \frac{f \cdot \sin \frac{\sigma}{2}}{2\pi \cdot r} \quad (1.8)$$

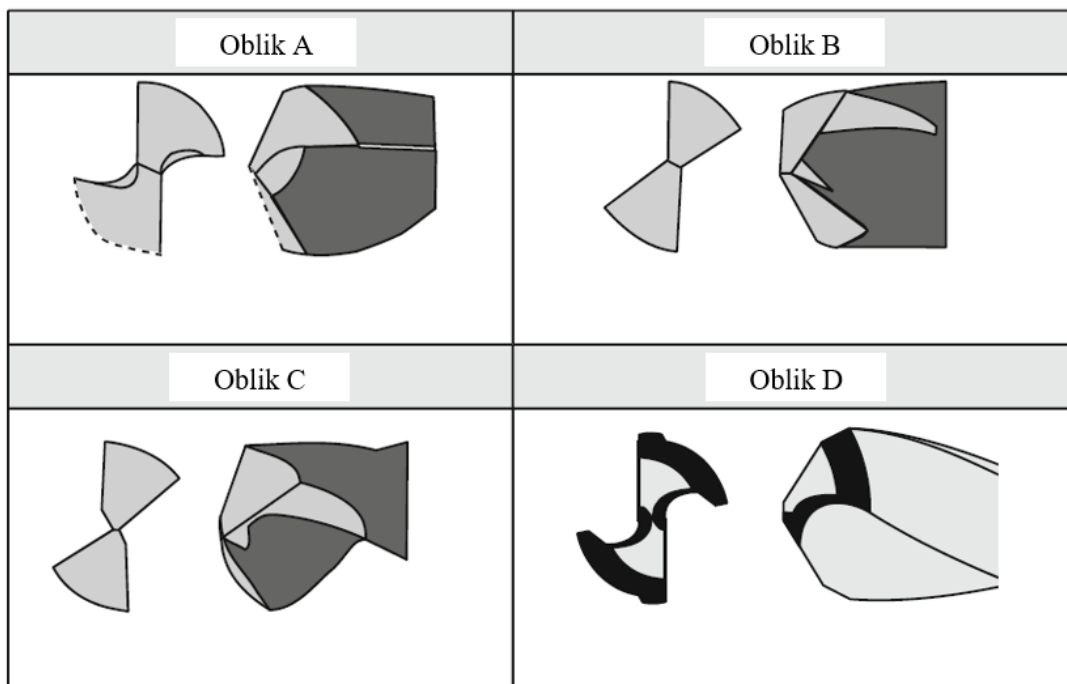
Također treba paziti na omjer posmične brzine i brzine rezanja jer se on mijenja uzduž rezne oštrice ovisno o udaljenosti od središta. Prevelika smična brzina može dovesti do izvijanja svrdla, a u krajnjem slučaju i do loma.

Vrh svrdla trebao bi prema [3] imati sljedeća svojstva:

- Trebao bi omogućiti samocentriranje svrdla
- Stražnji kut bi trebao biti dovoljno velik uzduž cijele rezne oštrice
- Rezna oštrica mora biti postojana
- Poprečna oštrica mora biti što kraća

Vrh je kod svrdla od brzoreznog čelika najčešće konični izrađen brušenjem. Također postoje i druge izvedbe vrha svrdla, a neke od njih su dane na slici 8.

- Oblika A – poprečna oštrica je smanjena na račun povećanja žljeba za odvođenje čestice. Samim time se postiglo smanjenje posmične sile, dok nema gotovo nikakav utjecaj na moment
- Oblika B – izrada je kao i kod oblika A, međutim dodatno se radi korekcija kuta stražnje površine, čime se postiže da kut ostane konstantan neovisno o kutu spirale. Time se pridonosi boljem formiranju odvojene čestice
- Oblika C – poprečna oštrica je smanjena na otprilike 6% u odnosu na polumjer svrdla. Samim time se postiže da je i kut stražnje površine na poprečnoj oštrici pozitivan
- Oblika D – izrada je kao i kod oblika C, međutim još se dodatno skose rubovi



**Slika 8. Specijalne izvedbe vrha svrdla [3]**

## 1.2. Arhitektonsko – građevni kamen

Danas se kamen pretežno koristi u arhitektonsko-građevinske svrhe po čemu je i ta skupina kamena dobila ime. Arhitektonsko-građevni kamen pripada u skupinu nemetalnih mineralnih sirovina. Vadi se u blokovima čijim se piljenjem i daljnjom obradom proizvode kameni elementi za daljnje korištenje poput uređenja interijera, oblaganja zidova, stepenica, spomen obilježja i sl.

Kameni blok može biti dobiven iz [5] :

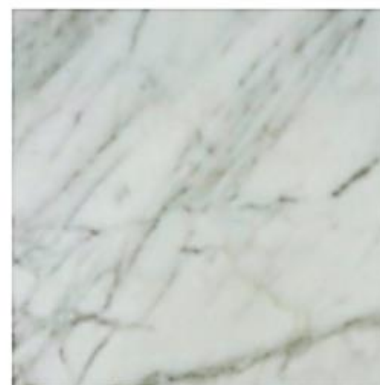
- Eruptivne ili magmatske stijene – nastaju ohlađivanjem i kristalizacijom prirodne silikatne taljevine, magme. Najpoznatije vrste kamena ove vrste su: granit (slika 9a. – Sardo Grey), diorit, gabro i dr.
- Sedimentne ili taložne stijene – nastaju trošenjem postojećih stijena, transportom trošenog materijala te njegovim postupnim taloženjem. Najpoznatije vrste kamena ove vrste su: vapnenci (slika 9b. – Gascoyne Blue), dolomiti, breče, pješčenjaci i dr.
- Metamorfne ili preobražene stijene – nastaju preobrazbom postojećih stijena kao rezultat promjenjivih fizičko – kemijskih uvjeta u periodima koji traju milijunima godina. Najpoznatije vrste kamena ove vrste su: mramori (slika 9c. - Stutuario), škriljevci i kvarciti.



a)



b)



c)

Slika 9. Primjeri kamena [6]

Kako bi se kamen mogao pravilno obraditi odnosno primijeniti, potrebno je utvrditi njegova fizikalna i mehanička svojstva na koja uvelike utječu njegova tekstura i struktura. Pod teksturom se podrazumijeva međusobne odnose sastojaka u kamenu, te njihov prostorni raspored i orijentaciju. Pod strukturom se podrazumijeva oblik pojedinih sastojaka u kamenu i njihovoj veličini. Kako bi se saznala struktura i teksturu kamena potrebno je provesti petrografsku analizu. Počinje se sa bilješkama s terena i makroskopskim detaljima uzoraka (npr. boja, veličina zrna i dr.). Zatim se pomoću mikroskopa određuju mikroskopski detalji uzoraka (npr. sastojci, volumni udio pojedinih minerala i dr.). Na temelju makroskopske i mikroskopske analize kamen se svrstava u određenu kategoriju prema međunarodnim znanstvenim klasifikacijama (HRN EN 12407:2000).

Najznačajnija svojstva kod obrade kamena su prema [27]: tlačna čvrstoća, tvrdoća, abrazivnost, poroznost, gustoća kamena i prostorna masa. Abrazivnost se definira kao sposobnost odupiranja trošenja kamena odnosno površinskog sloja uslijed kontakta nekog drugog tijela, dok je poroznost fizikalno svojstvo kamena kojim se definira udio šupljina (pora) unutar ispitnog uzorka. Treba razlikovati gustoću od prostorne mase kamena jer gustoća kamena ovisi o gustoći minerala od kojih je građen, pri tome ne uzimajući u obzir poroznost. Navedena gustoća uključujući poroznost definira prostornu masu.

Tvrdoća je svojstvo materijala koje se protivi zadiranju stranog tijela u njegovu površinu. Za ispitivanje tvrdoće najčešće se koriste metode prema: Vickers-u, Brinell-u, Rockwellu, Shore-u te Knoop-u. Kod ispitivanja tvrdoće kamena može se koristiti i primitivna Mohs-ova metoda koja se temelji na svojstvu da će tvrdi mineral prodrijeti u mekši mineral te je ta pojava lako vizualno uočljiva. Oprema za ispitivanje prikazana je na slici 10. Ljestvica Mohs-ove tvrdoće je od 1 do 10, gdje vrijednost 1 ima najmekši materijal - talk (mineral gline), dok vrijednost 10 ima dijamant. Mohs-ova skala nam može poslužiti samo za okvirno određivanje tvrdoće kamena, dok se za točnije i preciznije određivanje najčešće koristi Knoop-ova metoda.



**Slika 10. Oprema za ispitivanje tvrdoće po Mohs-u [7]**

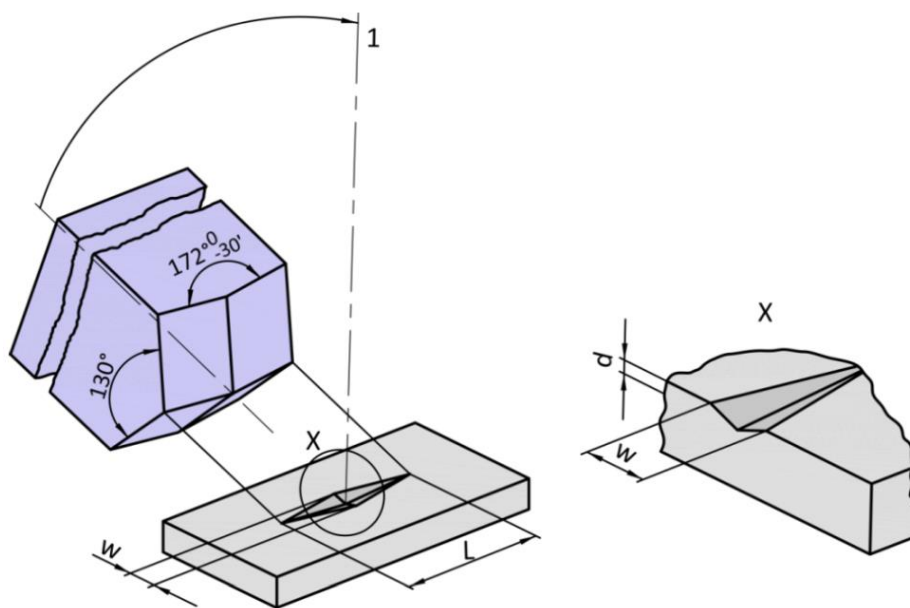
Osnovni princip rada [27] zasniva se na utiskivanju piramidalnog dijamantnog indentora različitih vršnih kutova u prethodnu pripremljenu ispitnu površinu koja mora imati visoki sjaj. Prema normi HRN EN 14205:2003 ispitivanje se vrši silom od 0,1 do 5N ovisno o vrsti kamena. Veličina otiska vrlo je malena zbog male sile ispitivanja što je vrlo pogodno kod ispitivanja krhkih materijala poput kamena i keramike. Nakon izvršene indentancije vrši se mjerenje otiska u cilju utvrđivanja vrijednosti tvrdoće. Otisak (prikazan na slici 11.) određene dubine ( $d$ ) je romboidnog oblika na kojem se mjeri dijagonala ( $L$ ) u svrhu izračunavanja tvrdoće prema sljedećem izrazu:

$$HK = 14,23 \frac{P}{L^2} \quad (1.9)$$

gdje je:

$P$  – sila utiskivanja, u N

$L$  – duljina najdulje dijagonale otiska, u mm



**Slika 11. Oblik indentora i otiska Knoop-ove metode [27]**

Tlačna čvrstoća jednaka je aksijalnom opterećenju probnog uzorka po jedinici površine kod kojeg nastaje razorna deformacija odnosno lom. Prema [27], rezultati ispitivanja ovise o poziciji mikropukotina unutar kamenog uzorka, o mehaničkoj stabilnosti minerala kao i o vrsti veziva između pojedinih minerala kamenog uzorka.

## 2. SNAGA, MOMENTI I SILE KOD BUŠENJA

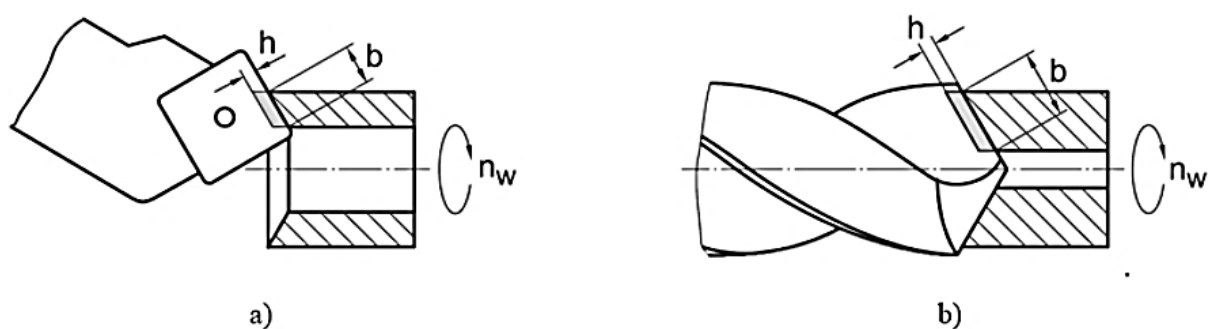
### 2.1. Snaga rezanja

Potrebna izlazna snaga kod bušenja ovisi o načinu formiranja odvojene čestice i trenju prilikom procesa obrade. Do formiranja odvojene čestice dolazi prilikom zahvata rezne oštrice u materijal. Spiralno svrdlo ima dvije rezne oštrice te tako dolazi do istovremenog formiranja dvije odvojene čestice. Prilikom obrade dolazi do pojave trenja na sljedeći mjestima

- Prednjoj površini svrdla
- Stražnjoj površini svrdla
- Između spiralnog dijela svrdla s predmetom obrade
- Između odvojene čestice i svrdla
- Između odvojene čestice s predmetom obrade

Kao posljedica toga, sile i momenti nisu konstantni kroz cijelu dubinu bušenja, odnosno dolazi do njihovog povećanja s dubinom.

Uloga glavnih reznih i poprečnih oštrica na promjenu snage, sila i momenata može se približno odrediti koristeći princip dekompozicije (*Engl. principle of decomposition*) [3]. U procesu „slobodnog bušenja“ (*Engl. „free drilling“*), prikazano na slici 12a), obradak u obliku cijevi ima manji promjer u odnosu na promjer svrdla te unutarnji promjer veći u odnosu na promjer jezgre svrdla. U tom slučaju samo glavna rezna oštrica sudjeluje u formiranju odvojene čestice. Ako se odvojena čestica može nesmetano odvoditi, potrebna snaga, momenti i sile odgovaraju onima kod tokarenja (slika 12a).



Slika 12. Fizikalni parametri kod tokarenja i bušenja [3]



Na slici 13. su prikazane sile rezanja gdje je rezultatna sila jednaka:

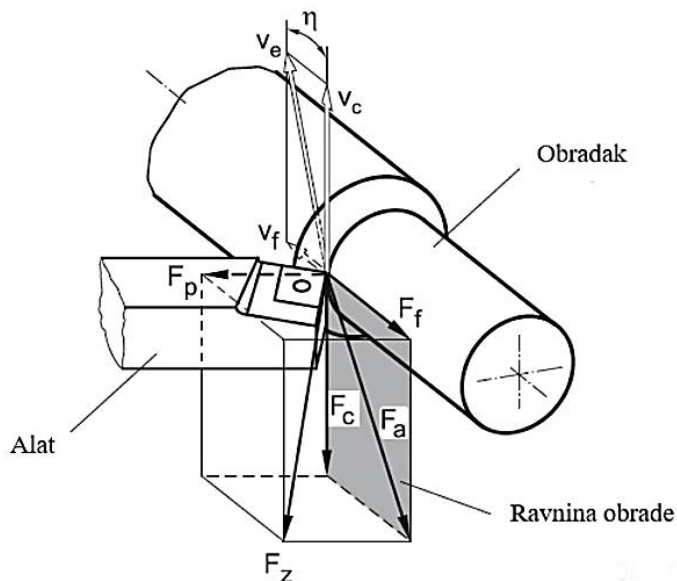
$$\vec{F}_R = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p$$

$F_R$  – rezultanta sile rezanja

$F_c$  – glavna sila rezanja

$F_f$  – posmična sila rezanja

$F_p$  – natražna sila rezanja



Slika 13. Sile rezanja kod tokarenja [3]

Glavna sila rezanja se izračunava po sljedećem izrazu:

$$F_c = k_c \cdot A \quad (2.1)$$

gdje je  $A$  površina poprečnog presjeka nedeformirane odvojene čestice, a  $k_c$  specifična glavna sila rezanja.

Sila rezanja ovisi o mnogo faktora, a neki od najutjecajnijih su:

- Materijal obradka (čvrstoća, deformabilnost)
- Brzina rezanja
- Oblik nedeformirane odvojene čestice (omjer tehnoloških parametara dubine rezanja i posmaka  $a_p/f$ , odnosno omjer fizikalnih parametara  $b/h$ )
- Geometrijski parametri ( $\alpha, \beta, \gamma$ )
- Uvjeti dodira između alata i obratka

Kada se uzmu u obzir gore navedeni parametri, iznos za specifičnu glavnu silu rezanja glasi:

$$k_c = k_{c0} \cdot \psi_0(k_{c0}; h; b; \gamma; v_c; \mu \dots) \quad (2.2)$$

gdje je  $k_{c0}$  specifična glavna sila rezanja u slučaju referentnih vrijednosti  $h, b, \gamma, v_c, \mu$  i dr., a  $\psi_0$  je bezdimenzijska veličina koja uključuje utjecaj navedenih parametara na promjenu specifične glavne sile rezanja.

Specifična glavna sila rezanja u slučaju referentnih vrijednosti utjecajnih parametara izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$k_{c0} = k_{c1,1} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-m_c} \quad (2.3)$$

gdje je  $h_0$  referentni geometrijski parametar,  $k_{c1,1}$  specifična glavna sila rezanja za  $b = h = 1$  mm,  $m_c$  konstanta koja uvećava iznos specifične sile rezanja ovisno o utjecajnim parametrima. Prema Kienzle-ovom modelu  $h_0 = 1$  mm, to znači da je specifična glavna sila rezanja  $k_{c1,1}$  općenito neprikladna za direktno izračunavanje snage množenjem s proizvodnošću  $Q_w$  jer i kod grube obrade parametar  $h$  iznosi manje od 1 mm. Stoga se u praksi češće koristi izraz za specifičnu glavnu silu rezanja gdje se uvrštava debljina nedeformirane odvojene čestice  $h_0$  kako slijedi:

$$k_{c1,x} = k_{c1,1} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-m_c} \quad (2.4)$$

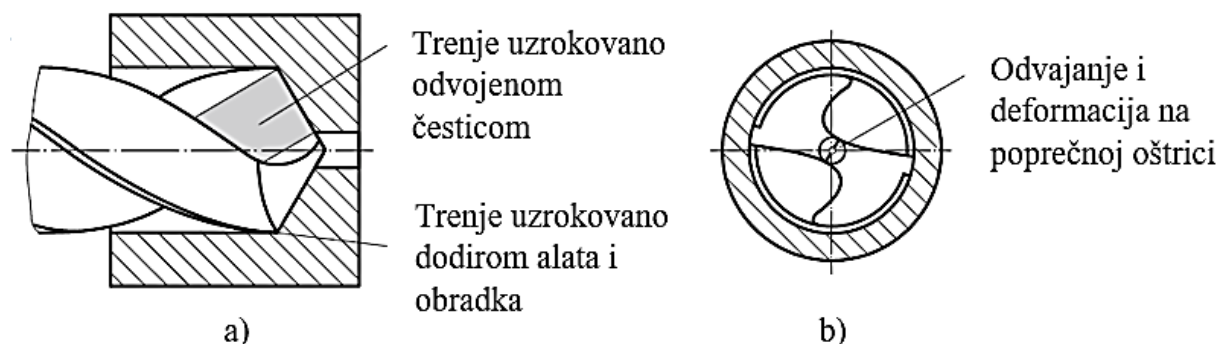
U tom slučaju, prema Kienzle-ovom modelu, osnovni izraz za izračun snage rezanja kod tokarenja glasi:

$$P_{ch} = k_{c1,x} \cdot Q_w \cdot \psi_0 = k_{c1,1} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{-m_c} \cdot Q_w \cdot \psi_0 \quad (2.5)$$

Međutim kod proširivanja provrta odvojena čestica se ne može nesmetano odvoditi (slika 14a.) te dolazi do pojave trenja. Također kod bušenja u puno (slika 14b.) treba uzeti u obzir utjecaj poprečne oštrice na povećanje snage rezanja. U tom slučaju izraz za snagu rezanja glasi:

$$P_c = P_{cq} + P_{ch} \quad (2.6)$$

gdje je  $P_{cq}$  komponenta snage rezanja koja uzima u obzir utjecaj poprečne oštrice na proces



**Slika 14. Proširivanje provrta i bušenje u puno [3]**

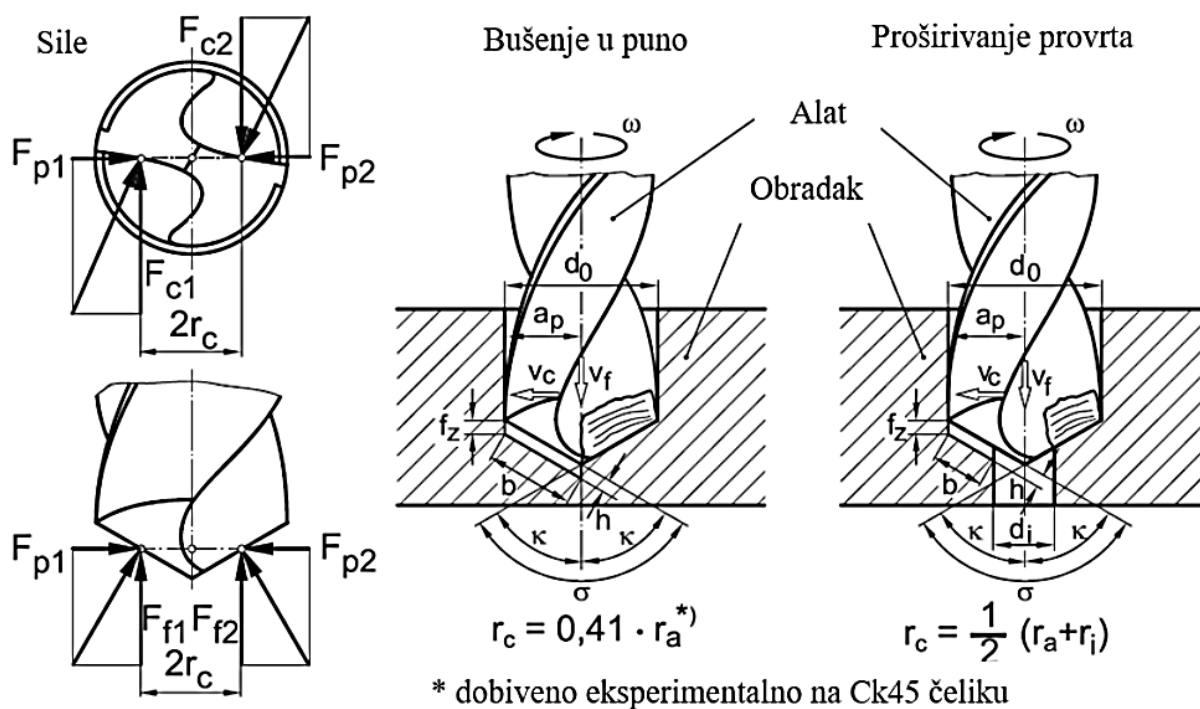
obrade.

Metoda dekompozicije valjana je samo ako su različiti čimbenici u procesu međusobno neovisni, što u ovom slučaju nije, npr. odvojena čestica nastala uslijed poprečne oštrice pridonosi ukupnom iznosu trenja odvojene čestice. Kako bi se odredile pojedine komponente snage rezanja, potrebno je odrediti pripadajuće momente. Ako je  $M_{ch}$  rezni moment na glavnim reznim oštricama,  $M_{cq}$  rezni moment na poprečnoj oštrici, a njihov omjer  $t_c = M_{ch}/M_{cq}$ , izraz za snagu rezanja glasi

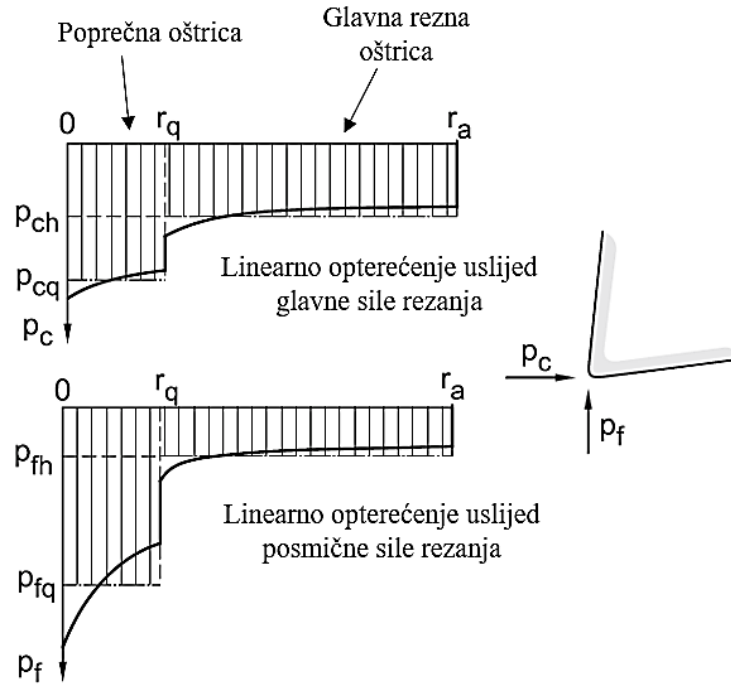
$$P_c = \left(1 + \frac{1}{t_c}\right) \cdot P_{ch} \quad (2.7)$$

## 2.2. Momenti i sile

Na slici 15. je prikazana geometrija odvojene čestice te sile koje se pojavljuju kod proširivanja provrta te bušenja u puno. Sile se prikazuju kao površinske sile preko kontaktnih površina u obliku normalnih i smičnih naprezanja. Za sljedeće izraze ta naprezanja su sažeta kao linearno raspodijeljena opterećenja. Slika 16. shematski prikazuje ta linearno raspodijeljena opterećenja, koja se sastoje od reznog opterećenja  $p_c$  i posmičnog opterećenja  $p_f$  na glavnoj reznoj i poprečnoj oštrici prikazane u zajedničkoj ravnini.



Slika 15. Geometrija odvojene čestice te sile kod bušenja [3]



**Slika 16. Opterećenje na glavnoj reznj i poprečnoj oštrici [3]**

Na slici 16. vidljivo je da je utjecaj polumjera na specifičnu glavnu silu rezanja malen. Stoga se pretpostavlja da je opterećenje konstantno unutar sljedećih granica:  $0 < r \leq r_q$  i  $r_q < r \leq r_a$ . Prema tome, moment bušenja računa se prema sljedećem izrazu:

$$M_c = 2 \cdot \int_0^{r_q} p_{cq} \cdot r dr + 2 \cdot \int_{r_q}^{r_a} p_{ch} \cdot r dr \quad (2.8)$$

Ako se omjer opterećenja uslijed glavne sile rezanja označi kao  $s_c = p_{cq}/p_{ch}$  i omjer polumjera kao  $q = r_q/r_a$ , izraz poprima sljedeći oblik:

$$M_c = p_{ch} \cdot r_a^2 \cdot (1 - q^2 + s_c \cdot q^2) \quad (2.9)$$

Omjer pojedinih komponenata reznog momenta je:

$$t_c = \frac{M_{ch}}{M_{cq}} = \frac{p_{ch}(1 - q^2)}{p_{cq} \cdot q^2} \quad (2.10)$$

Pomoću gore navedenog omjera može se izračunati omjer opterećenja:

$$s_c = \frac{1 - q^2}{q^2} \cdot \frac{1}{t_c} \quad (2.11)$$

Glavna sila rezanja računa se prema sljedećem izrazu:

$$F_c = \int_0^{r_q} p_{cq} dr + \int_{r_q}^{r_a} p_{ch} dr \quad (2.12)$$

Uvrštavanjem omjera  $s_c$  i  $q$  dobije se:

$$F_c = p_{ch} \cdot r_a (1 - q + s_c \cdot q) \quad (2.13)$$

Pomoću glavne sile rezanja i reznog momenta, može se izračunati efektivni polumjer  $r_c$  prilikom bušenja u puno prema sljedećem izrazu:

$$r_c = \frac{M_c}{2 \cdot F_c} = \frac{1 + q^2 \cdot (s_c - 1)}{2 \cdot [1 + q(s_c - 1)]} \quad (2.14)$$

Koristeći jednadžbe 2.5, 2.7 i 2.9 može se odrediti linearno opterećenje na glavnoj reznog oštrici, uz kutnu brzinu  $\omega$  izraz glasi:

$$p_{ch} = \frac{P_c}{\omega \cdot r_a^2 \cdot [1 + q^2(s_c - 1)]} \quad (2.15)$$

Prema slici 15. izraz za posmičnu silu glasi:

$$F_f = \int_0^{r_q} p_{fq} dr + \int_{r_q}^{r_a} p_{fh} dr \quad (2.16)$$

Ukoliko se omjer opterećenja uslijed posmične sile rezanja označi kao  $s_f = p_{fq}/p_{fh}$ , tada izraz glasi:

$$F_f = (s_f \cdot q + 1 - q)p_{fh} \cdot r_a \quad (2.17)$$

Specifično posmično opterećenje na glavnoj reznog oštrici može se odrediti koristeći Kienzle-ov model. Tada se dobije:

$$p_{ch} = k_{c1,1} \frac{h^{1-m_c}}{\sin \sigma/2 \cdot [1 - q(1 - s_c)]}; \quad h = f_z \cdot \sin \sigma/2 \quad (2.18)$$

Gore navedene jednadžbe vrijede u slučaju bušenja u puni materijal. Kod proširivanja provrta gdje vrijedi  $r_i > r_q$  izrazi za rezni moment na glavnim reznim oštricama, efektivni polumjer i glavnu silu rezanja glase:

$$M_{ch} = \frac{1}{\omega} \cdot P_{ch} \quad (2.19)$$

$$r_c = \frac{M_c}{2 \cdot F_c} = \frac{1}{2}(r_a + r_i) \quad (2.20)$$

$$F_c = \frac{M_c}{2 \cdot r_c} \quad (2.21)$$

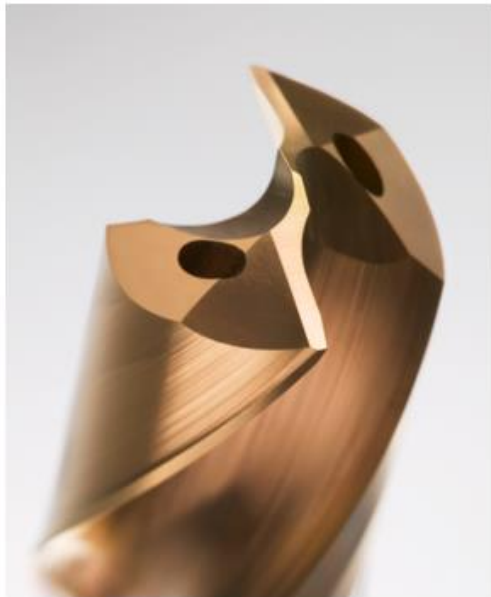
Analogno gore navedenim izrazima, izraz za posmičnu silu prema Kienzle-ovom modelu glasi:

$$F_f = k_{f1,1} \cdot \frac{r_a - r_i}{\sin \frac{\sigma}{2}} \cdot h^{1-m_f} \quad (2.22)$$

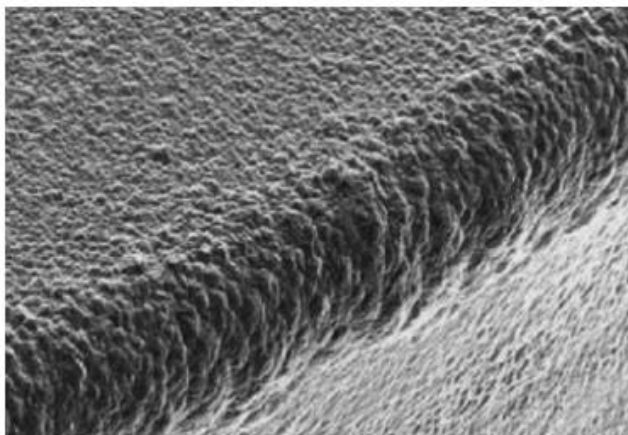
### 3. TROŠENJE ALATA

Radno okruženje kod većine procesa obrade odvajanjem čestica je vrlo okrutno. Razvijaju se vrlo visoki pritisci koji djeluju na sam alat, dok temperature na pojedinim dijelovima alata mogu doseći i preko 750 °C [8]. Time se postižu idealni uvjeti da dođe do zavarivanja pod pritiskom između kontaktne površine alata i odvojene čestice. Često je odvojena čestica više od 5 puta tvrđa [8] od materijala obrade. Stoga, kako bi se smanjio afinitet između odvojene čestice i alata potrebno je koristiti materijale alata koji su inertni u odnosu na obrađivani materijal kao što su npr. keramika, tvrdi metali i sl. Međutim, samo pravilnim izborom materijala alata ne izbjegava se u potpunosti problem s trošenjem alata. Kako bi se povećala tvrdoća površine alata i smanjilo trenje koriste se razne prevlake, a u većini slučajeva, pozitivan utjecaj na sam proces obrade ima i sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP).

Prednja i stražnja površina alata se možda na oko čine vrlo glatkima (slika 17a.), međutim ukoliko se pogleda površina pod mikroskopom, vidljivo je kako se na površini svejedno nalaze izbočenja i udubine (slika 17b). Samim time dolazi do smanjenja kontakte površine, odnosno povećanja koeficijenta trenja i na posljeticu do trošenja površine alata.



a) [9]



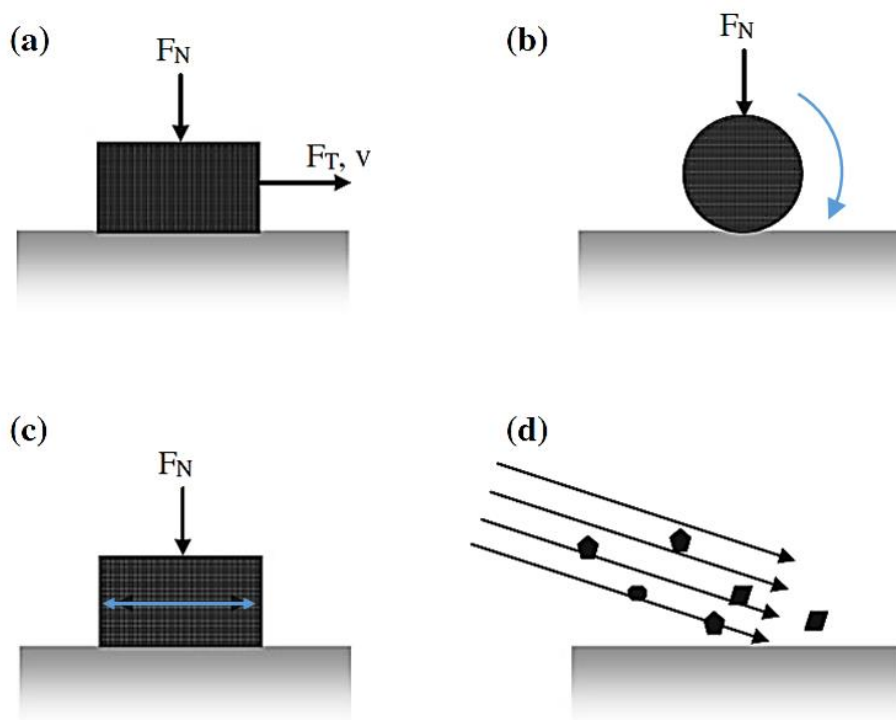
b) [10]

**Slika 17. Površina alata vidljiva (a) golim okom i (b) pomoću mikroskopa**

U ovom poglavlju detaljnije su objašnjeni mehanizmi i oblici trošenja te kako sam proces trošenja utječe na životni vijek alata.

### 3.1. Mehanizmi trošenja alata

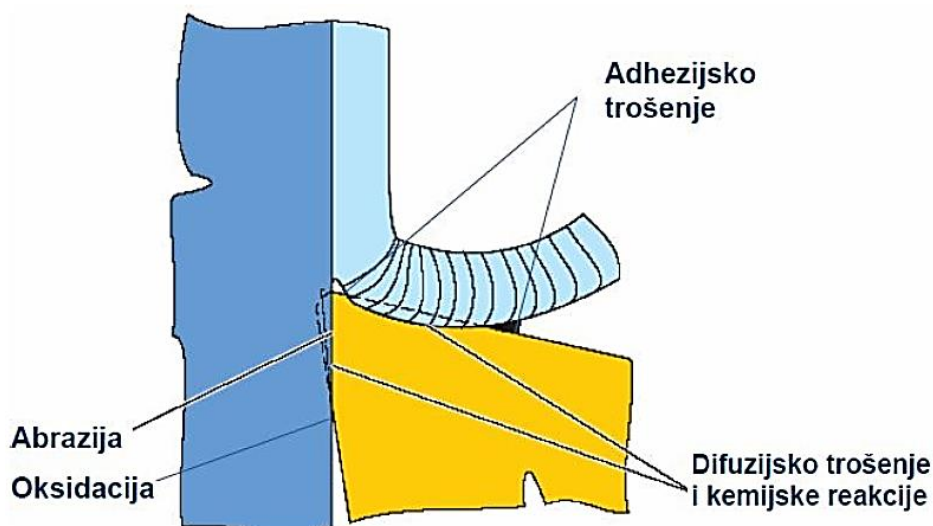
Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [11]. Sam proces trošenja karakterizira relativno gibanje dvaju tijela koja su u međusobnom dodiru. Neki primjeri relativnih gibanja između tijela u kontaktu i pripadajući procesi trošenja dani su na slici 18.



**Slika 18. Primjeri relativnih gibanja između tijela u kontaktu i pripadajući procesi trošenja [12]**

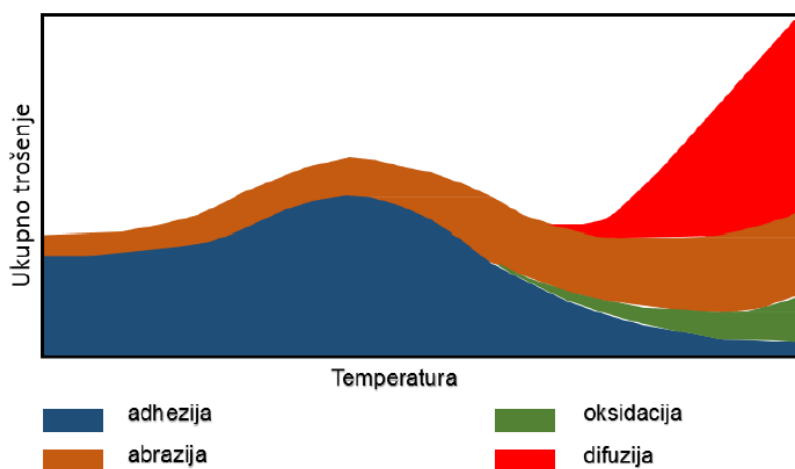
- Klizno trošenje – jedno tijelo klizi po drugom tijelu (slika 18a.)
- Kotrljajuće trošenje – jedno tijelo kotrlja se po drugom tijelu (slika 18b.)
- Izjedanje – nastaje između dviju, prividno čvrsto spojenih površina zbog vibracijskog relativnog gibanja s malim amplitudama (slika 18c.)
- Erozijsko trošenje – gubitak materijala s površine krutog tijela zbog relativnog gibanja (strujanja) fluida u kojem se nalaze krute čestice (slika 18d.)

Unatoč velikom broju procesa i oblika trošenja alata, dosadašnjim istraživanjima je utvrđeno da do pojave oštećenja dolazi najčešće uslijed 5 mehanizama trošenja [2], a to su: abrazija, adhezija, difuzija, oksidacija (tribokorozija) i umor površine. Razumijevanje svakog od pet mehanizma trošenja ključno je za nadziranje procesa trošenja.



**Slika 20. Mehanizmi trošenja na alatu tijekom obrade [2]**

Na slici 19. prikazana je raspodjela pojedinih mehanizama trošenja tijekom obrade. Adhezijsko trošenje najčešće se javlja između prednje površine alata i odvojene čestice. Abrazija se javlja između stražnje površine alata i obrađene površine obratka. Na mjestu gdje je stražnja površina alata izložena zraku dolazi do oksidacije, dok do difuzijskog trošenja dolazi na mjestu dodira alata s odvojenom česticom ili obrađenom površinom.



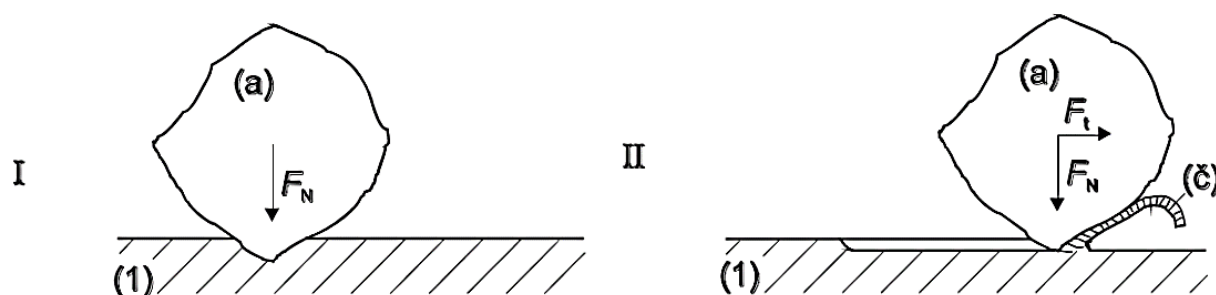
**Slika 19. Udjeli mehanizama trošenja u ukupnom trošenju ovisno o temperaturi [2]**

Udjeli mehanizama trošenja u ukupnom trošenju u ovisnosti o temperaturi, prikazani su na slici 20. Oksidacijsko i difuzijsko trošenje javlja na višim temperaturama, adhezijsko trošenje na nižim temperaturama, dok je abrazijsko trošenje uvijek prisutno, neovisno o temperaturi.



### 3.1.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama [11]. Sam proces trošenja može se opisati kao mikrorezanje abrazivom (slika 21.) nedefinirane geometrije oštrice s dvije faze jediničnog događaja:

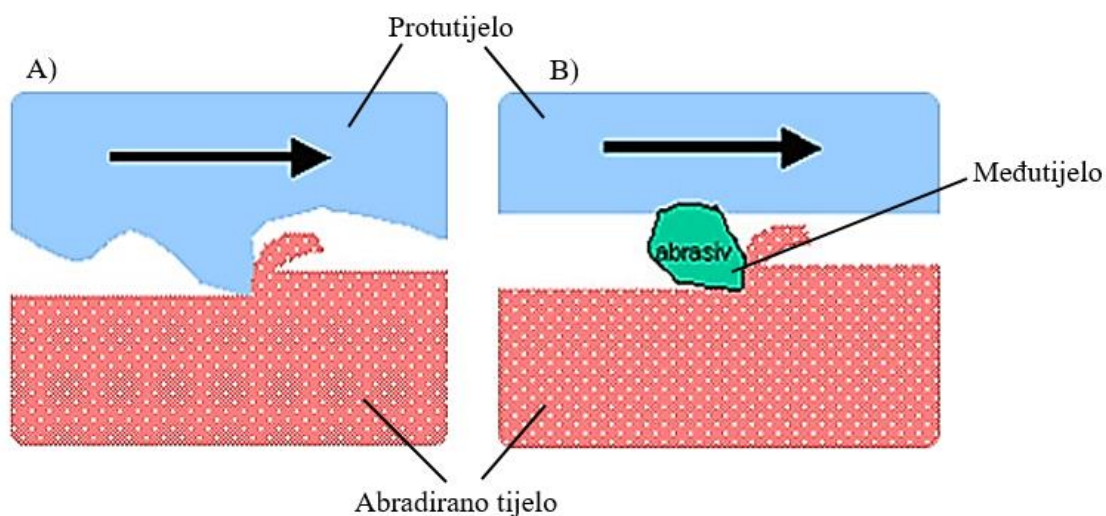


**Slika 21. Abrazijsko trošenje [11]**

I – prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$  (trošenje je proporcionalno  $F_N$ )

II – istiskivanje materijala u obliku odvojene čestice (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$

Ovisno o strukturi tribosustava u kojem se zbiva, abrazija se može pojaviti u 2 oblika:



**Slika 22. Tribosustav abrazije**

- Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo) (slika 22a.)
- Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se giba slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski (slika 22b.)

Odnosenje materijala u dodiru tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dva tijela [11]. Tomu je razlog što čestice abrazije samo oko 10% vremena provode u odnosu materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.

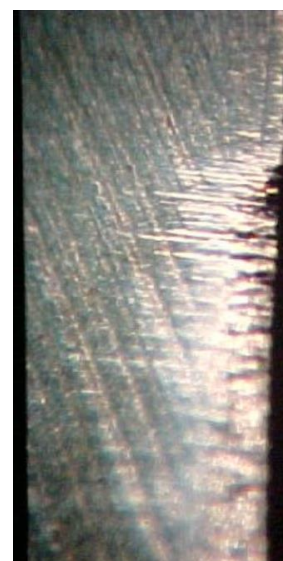
Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine razlikujemo:

- Mikrobrazdanje
- Mikrorezanje
- Mikronaprsnuća
- Mikroumor

Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri slučaja [11]:

- „Čista“ abrazija – djeluje kada je tvrdoća abraziva veća od tvrdoće trošene podloge. Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spirale u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine, kada je abradirani materijal krhak
- Selektivna abrazija – djeluje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv „reže“ samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna tvrđe faze
- „Nulta“ abrazija – nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja. Najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine (boriranje, vanadiranje, CVD, PVD)

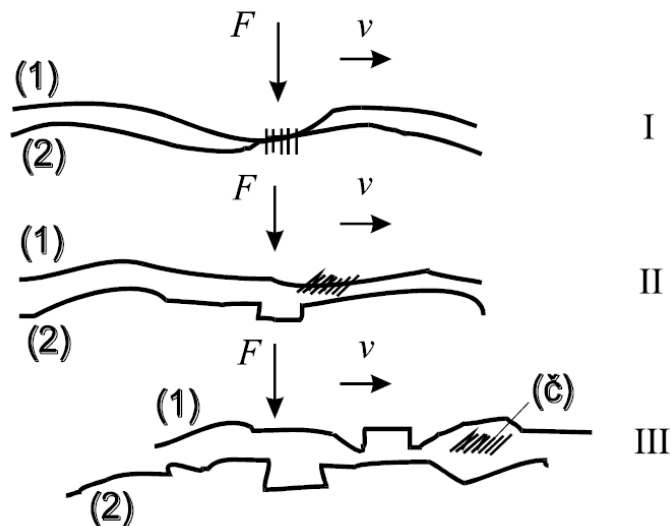
Na slici 23. je prikazan primjer abrazijskog trošenja alata. Kako bi alat bio otporan na prvu fazu mehanizma abrazije najznačajniji je omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine, a na drugu fazu mehanizma abrazije najutjecajniji čimbenik je način napredovanja pukotine koji općenito može biti: duktilni, krhki i umor površine. [11]



**Slika 23. Primjer abrazijskog trošenja [13]**

### 3.1.2. Adhezija

Adheziju karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, zbog procesa zavarivanja krutih faza [11]. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze (slika 24):



Slika 24. Adhezijsko trošenje [11]

- I – nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina
- II – raskidanje adhezijskog spoja. Čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para
- III – otkidanje čestice (eventualno). Oblik čestice trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićav

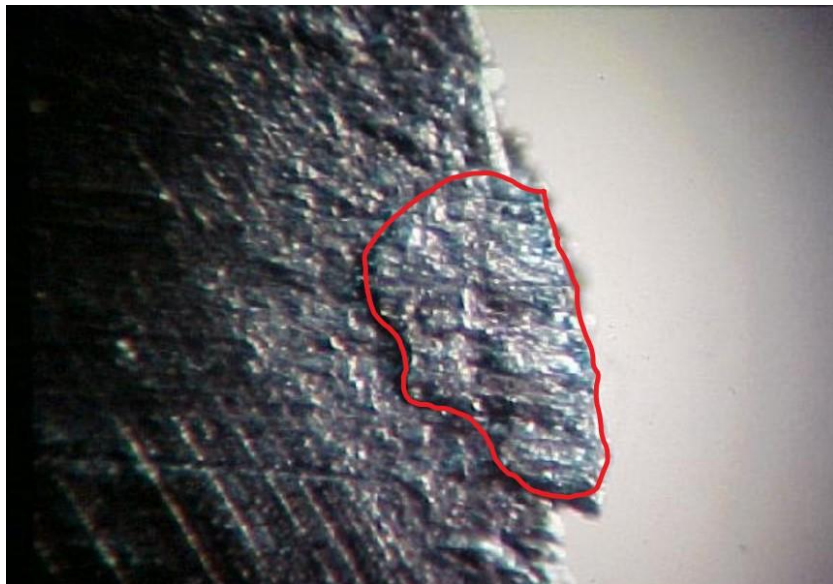
Provedbom raznih istraživanja, utvrđeno je da postoje tri osnovna pravila vezana uz adhezijsko trošenje [14], a to su:

- Trošenje je proporcionalno duljini klizanja
- Trošenje je proporcionalno opterećenju (ali samo do neke određene sile)
- Trošenje je obrnuto proporcionalno tvrdoći mekšeg materijala u paru

Otpornost na adhezijsko trošenje [11] ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost. Tribološka kompatibilnost je prikladnost za rad u kliznom paru i bolja je za materijale koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru. Suprotna je metalurškoj kompatibilnosti tj. uzajamnoj topljivosti metala u krutom stanju. Na tribološku kompatibilnost povoljno djeluje smanjenje broja kliznih ravnina, stoga je najlošija kompatibilnost između materijala koji imaju plošno centriranu kubnu kristalnu rešetku (*engl. face-centered cubic, FCC*), a najbolja

kompatibilnost materijala koji imaju tzv. gusto pakiranu heksagonsku rešetku (*engl. close-packed hexagonal lattice, HCP*).

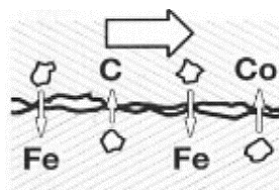
U postupcima obrade odvajanjem dolazi do adhezijskog trošenja zbog naljepljivanja materijala obrade na alat uslijed lokalnog djelovanja visokog tlaka i temperature. Jedan primjer adhezijskog trošenja dan je na slici 25.



Slika 25. Primjer adhezijskog trošenja [14]

### 3.1.3. Difuzija

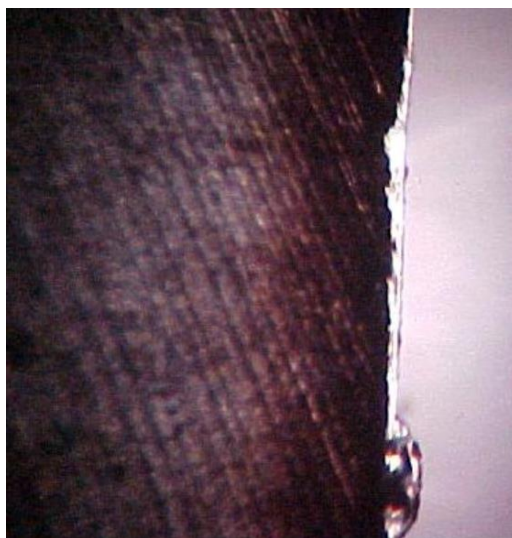
Difuzija je pojava premještanja kemijskih tvari u plinovitom, tekućem i čvrstom stanju. Kod obrade odvajanjem, najzanimljivija je difuzija u čvrstom stanju gdje dolazi do izmjena kemijskih elemenata između alata i materijala obrade. Atomi prelaze (slika 26.) iz područja visoke koncentracije u područje niske koncentracije atoma [14].



Slika 26. Difuzija [15]

Na intenzitet difuzijskog trošenja [16] utječe temperatura, metalurška kompatibilnost materijala u dodiru (topljivost materijala alata u materijalu obratka) te vrijeme dodira. U obradi odvajanjem čestica se pojavljuje iz razloga jer se na relativno malenom mjestu dodira između alata i odvojene čestice ili alata i obrađene površine razvijaju visoke temperature.

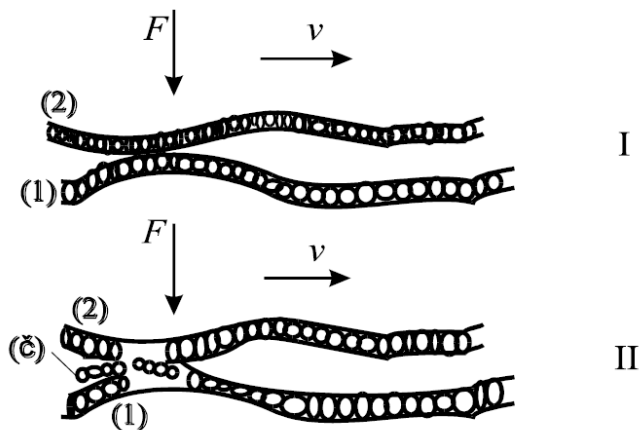
Na slici 27. prikazan je karakterističan primjer difuzije. Vidljivo je crno područje oko rezne oštrice što je posljedica difuzije. Kao posljedica dolazi do slabljenja površine alata i naposljetku do intenziviranja abrazijskog i adhezijskog trošenja.



Slika 27. Primjer difuzijskog trošenja [14]

#### 3.1.4. Oksidacija (tribokorozija)

Oksidacija ili tribokorozija je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem [11]. Jedinični događaj oksidacije odnosno tribokorozije sastoji se od dvije faze i prikazan je na slici 28.:



Slika 28. Oksidacija [11]

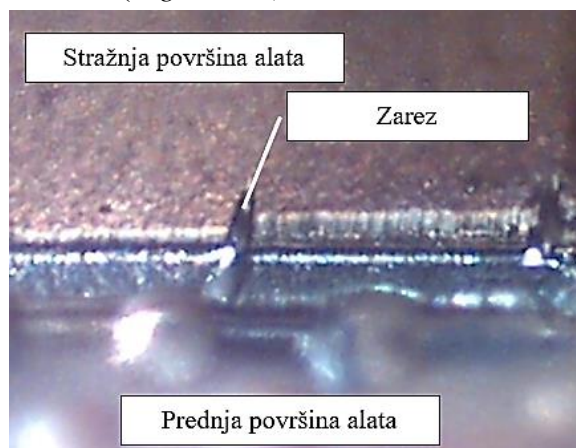
I – stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije

II – mjestimično razaranje sloja produkata korozije

Slojevi produkata korozije su vrlo tanki, stoga je i oksidacija slabo intenzivan mehanizam trošenja. Najvažniji čimbenik za otpornost na oksidaciju [11] je kemijska pasivnost materijala u određenom mediju. U pravilu „poželjan“ mehanizam trošenja jer slojevi proizvoda korozije

zaštićuju metalne površine od neposrednog dodira metal/metal, međutim može uzrokovati slabljenje površine alata čime se intenziviraju abrazija i adhezija.

Karakterističan oblik trošenja (slika 29.) kod kojeg je prisutna oksidacija kao mehanizam trošenja je tzv. zarez (*engl. notch*)



Slika 29. Primjer oksidacijskog trošenja [14]

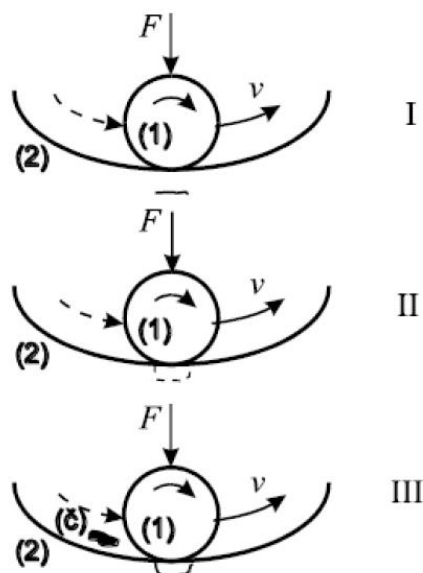
### 3.1.5. Umor površine

Umor površine je mehanizam trošenja kod kojeg dolazi do odvajanja čestice s površine uslijed cikličkih naprezanja [11]. Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 30, a može se opisati s tri faze:

I – stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine. Najveće je smično naprezanje kod koncentriranog dodira uvijek ispod same površine. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestice

II – napredovanje pukotine. Podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od tog trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice

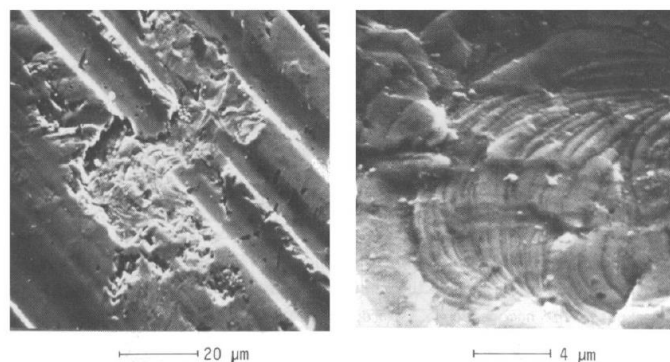
III – ispadanje čestica trošenja, obično oblika pločice ili iverka. Na površini dolazi do oštećenja u obliku rupice te se stoga ovaj oblik trošenja često naziva pitting.



Slika 30. Umor površine [11]

Otpornost na umor površine naziva se još i dinamička izdržljivost površine. Ovisi o otporu gibanju dislokacija, a na njega utječe veliki broj čimbenika [11] kao što su: podpovršinski koncentriratori naprezanja, površinske pogreške, diskontinuiteti u geometriji dodira i dr. Na slici 31. je prikazan izgled površine oštećene umorom materijala.

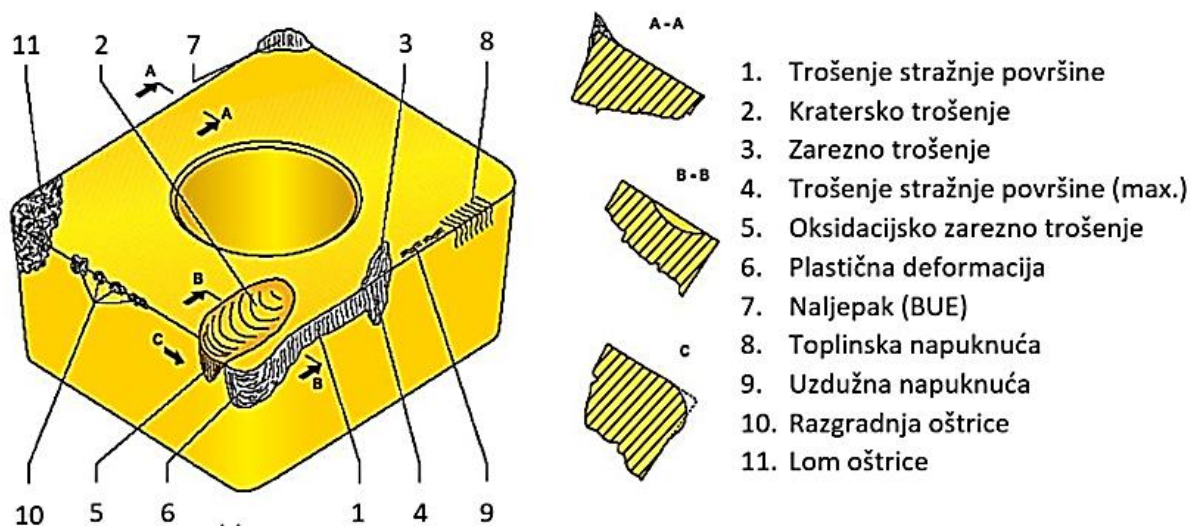




Slika 31. Izgled površine oštećene umorom površine [11]

### 3.2. Oblici trošenja

Tijekom procesa obrade alat je često izložen različitim uvjetima odnosno opterećenjima koja uzrokuju pojavu različitih mehanizama trošenja. Ovisno o dominantnim mehanizmima trošenja, razlikuju se i različiti oblici trošenja. Koji od mehanizama trošenja će biti dominantni, najčešće ovisi o: parametrima obrade, obliku rezne oštrice, vrsti alata, vrsti odvojene čestice, načinu odvođenja odvojene čestice, načinu hlađenja i dr. Na slici 32. su prikazani najčešći oblici trošenja i uobičajeni položaji njihove pojave.

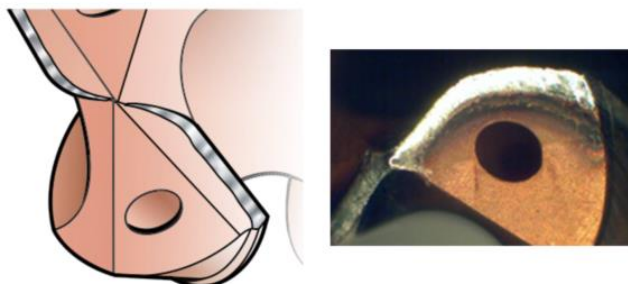


Slika 32. Uobičajeni položaji oblika trošenja reznih alata [2]

U nastavku su navedeni i objašnjeni najčešći oblici trošenja na svrdlima, koje su posljedice, kako nastaju i kako se mogu izbjeći.

### 3.2.1. Trošenje stražnje površine glavne rezne oštrice

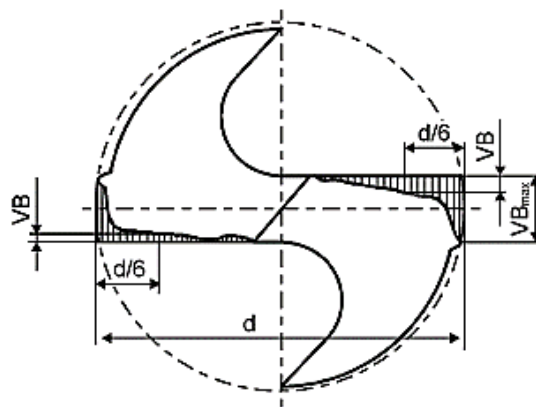
Trošenje stražnje površine nastaje zbog kontakta/trenja između stražnje površine alata i obrađene površine obratka. Uzrokuje ga prevelika brzina rezanja, premali posmak, neodgovarajuća kvaliteta materijala alata za obradu danog materijala i nedovoljno korištenje sredstva za hlađenje i podmazivanje. Shematski i stvarni prikaz ovog oblika trošenja dan je na slici 33.



**Slika 33. Trošenje stražnje površine [17]**

Kako bi se izbjegao ovaj oblik trošenja, potrebno je smanjiti brzinu rezanja, povećati posmak, izabrati bolju kvalitetu materijala alata ili povećati učinkovitost sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Ovaj oblik trošenja je preferiran iz razloga jer se alat može koristiti i dulje od trenutka početka trošenja. Prema [18], svrdlo se može koristiti sve dok se nalazi unutar dopuštene vrijednosti parametara  $VB$  i  $VB_{\max}$  kao što je prikazano na slici 34.

Prema međunarodnim standardima za različite materijale alata (brzorezni čelik, tvrdi metal, keramika) preporučuju se različiti kriteriji istrošenosti.

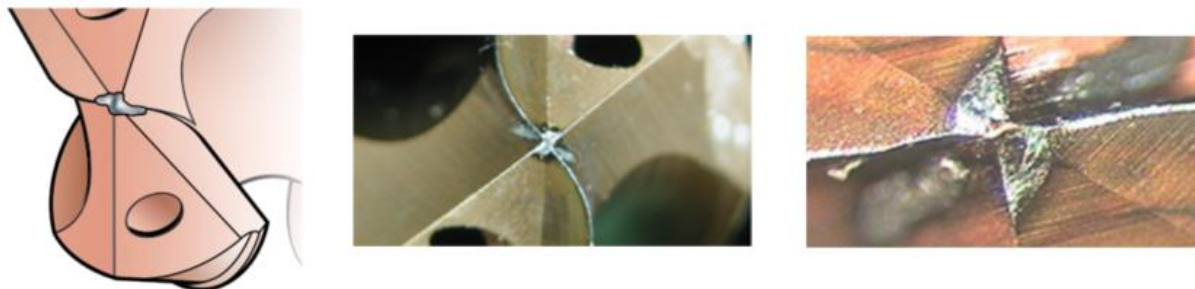


**Slika 34. Parametri trošenja kod trošenja stražnje površine [18]**



### 3.2.2. Trošenje stražnje površine poprečne oštrice

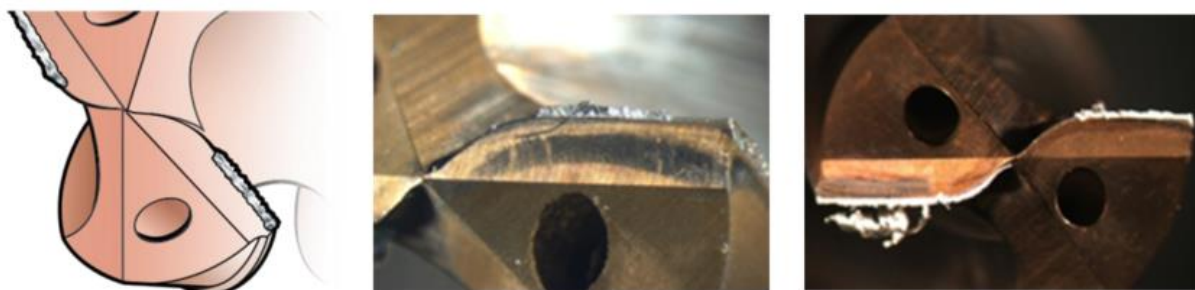
Trošenje stražnje površine poprečne oštrice, prikazano na slici 35., najčešće uzrokuje premala brzina rezanja i/ili prevelik posmak. Stoga, kako bi se smanjio ovaj oblik trošenja potrebno je povećati brzinu rezanja i/ili smanjiti posmak. Ovaj oblik trošenja može izazvati netočno centriranje svrdla što može izazvati pojavu većeg broja nesukladnih izradaka.



Slika 35. Trošenje stražnje površine poprečne oštrice [17]

### 3.2.3. Naljepak

Naljepak (*engl. Built-Up Edge, BUE*) je nakupina materijala obrade na prednjoj površini alata. Dolazi do zavarivanja materijala uslijed djelovanja visokog tlaka nastalog tijekom procesa obrade. Glavni uzroci pojavljivanja ovog oblika trošenja su: neodgovarajuća brzina rezanja, premala razvijena temperatura između prednje površine alata i odvojene čestice, neodgovarajući materijal alata (veliki afinitet materijala), korištenje alata bez prevlaka, prenizak postotak ulja u sredstvu za hlađenje, ispiranje i podmazivanje te neodgovarajuća geometrija rezne oštrice. Na slici 36. prikazan je ovaj oblik trošenja.



Slika 36. Naljepak [17]

Moguća rješenja za eliminaciju ovog oblika trošenja su: odabrati odgovarajuću brzinu rezanja, odabir odgovarajuće geometrije rezne oštrice, korištenje svrdla s prevlakom (npr. PVD prevlaka) i povećati postotak ulja u sredstvu za hlađenje, ispiranje i podmazivanje.

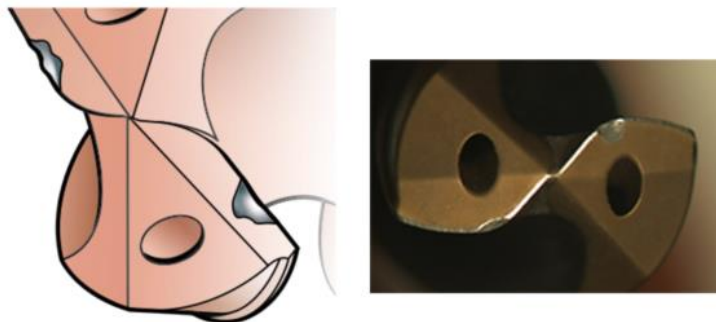
Ukoliko se ne može u potpunosti ukloniti nastanak naljepka, prema [17], preporučuje se odabir brzine rezanja koja će rezultirati smještanjem naljepka na najčvršći dio reznog dijela svrdla, a to je na otprilike 50% promjera svrdla. Na slici 37. je prikazano kako brzina rezanja utječe na smještaj samog naljepka. Povećanjem učestalosti vrtnje (a), naljepak se smješta sve bliže središtu svrdla, a smanjenjem učestalosti vrtnje (b) se smješta prema rubu svrdla pa čak i eliminira u potpunosti.



Slika 37. Utjecaj brzine rezanja na mjesto nastanka naljepka [17]

### 3.2.4. Lom na glavnoj reznoj oštrici

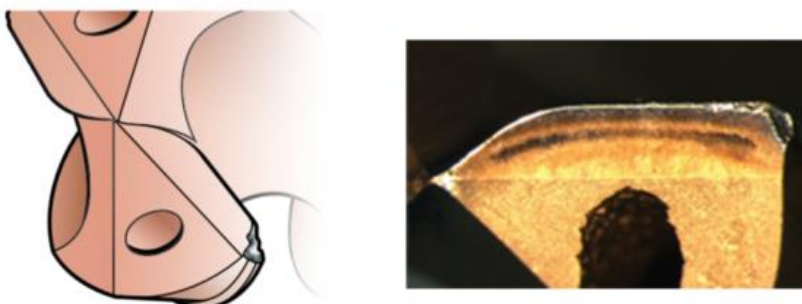
Lom na glavnoj reznoj oštrici (slika 38.) je vrlo čest oblik trošenja prilikom proširivanja provrta jer dolazi do nastanka velikog naprezanja u trenutku dodira svrdla i obratka. Dodatni mogući uzrok nastanka ovog oblika trošenja može biti da se postigao maksimalni iznos dopuštenog trošenja stražnje površine glavne rezne oštrice (parametri  $VB$  i  $VB_{\max}$ ). Razlog tomu je taj što povećanjem istrošenosti rastu sile rezanja, a samim time i naprezanje na glavnoj reznoj oštrici. Kada naprezanje prijeđe lomnu čvrstoću materijala rezne oštrice, doći će do nastanka loma. Također ukoliko se koristi alat od vrlo tvrdog materijala, uslijed dinamičkih opterećenja može doći do nastanka loma. Moguća rješenja za eliminaciju ovog oblika trošenja su: korištenje svrdla s izmjenjivim pločicama (prilikom proširivanja provrta), ranija zamjena svrdla ili korištenje alata koji je izrađen od mekšeg odnosno žilavijeg materijala.



Slika 38. Lom na glavnoj reznoj oštrici [17]

### 3.2.5. Lom vrha rezne oštrice

Lom vrha rezne oštrice prikazan je na slici 39., a najčešće nastaje uslijed neodgovarajućeg stezanja svrdla/obratka, isprekidane obrade te dovođenja nedovoljne količine sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (toplinska napuknuća). Stoga je potrebno provjeriti da li su obradak i alat pravilno stegnuti, smanjiti posmak te provjeriti sustav dovođenja sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje.

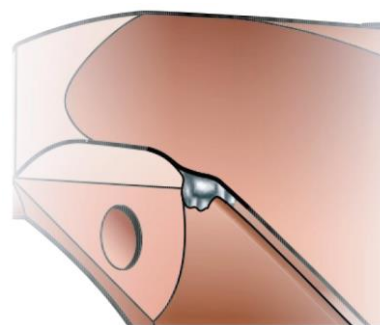


Slika 39. Lom vrha rezne oštrice [17]

### 3.2.6. Ostali oblici trošenja

#### Plastična deformacija

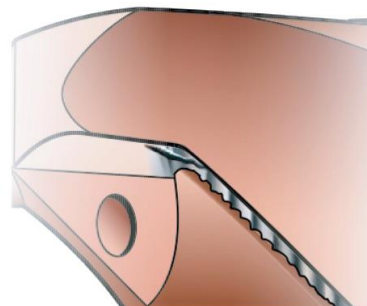
Do plastične deformacije (slika 40.) može doći ukoliko su brzina rezanja i posmak preveliki, nedovoljne količine sredstva za hlađenje i ispiranje ili se koristi neodgovarajuća kvaliteta materijala alata. Stoga je potrebno smanjiti brzinu rezanja i posmak, povećati protok sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje te koristiti tvrđu kvalitetu materijala alata.



Slika 40. Plastična deformacija [17]

#### Toplinska napuknuća

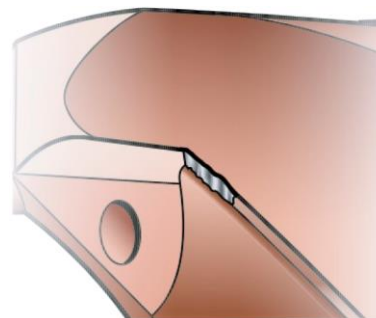
Toplinska napuknuća (slika 41.) nastaju uslijed dovođenja nedovoljne količine sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Stoga je potrebno provjeriti da li sustav za dovođenje sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje radi kako je i zamišljeno ili povećati protok sredstva ukoliko je to moguće. Također je potrebno provjeriti ukoliko se u spremniku nalazi dovoljna količina sredstva.



Slika 41. Toplinska napuknuća [17]

### Trošenje pomoćne rezne oštrice

Do trošenja pomoćne rezne oštrice svrdla (slika 42.) može doći uslijed dovođenja neodgovarajuće količine sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, prevelike brzine rezanja ili obrade izrazito abrazivnog materijala. Kako bi se eliminirao ovaj oblik trošenja, preporuča se korištenje čistog ulja ili emulzije s većim udjelom ulja kao sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, smanjiti brzinu rezanja i korištenje alata koji je izrađen od tvrdog materijala.



**Slika 42. Trošenje pomoćne rezne oštrice [17]**

### Lom svrdla

Ovaj oblik trošenja je prikazan na slici 43. te je vrlo neželjen jer može izazvati značajna oštećenja obratka, ali i oštećenja stroja. Nastaje uslijed obrade s neodgovarajućim svrdlom, nedovoljne snage glavnog vretena, zaglavljivanja odvojene čestice, prevelikog posmaka i prekomjernog trošenja. Stoga je potrebno odabrati odgovarajuće svrdlo, provjeriti sustav dovođenja sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, smanjiti posmak te češće provjeriti intenzitet trošenja svrdla.

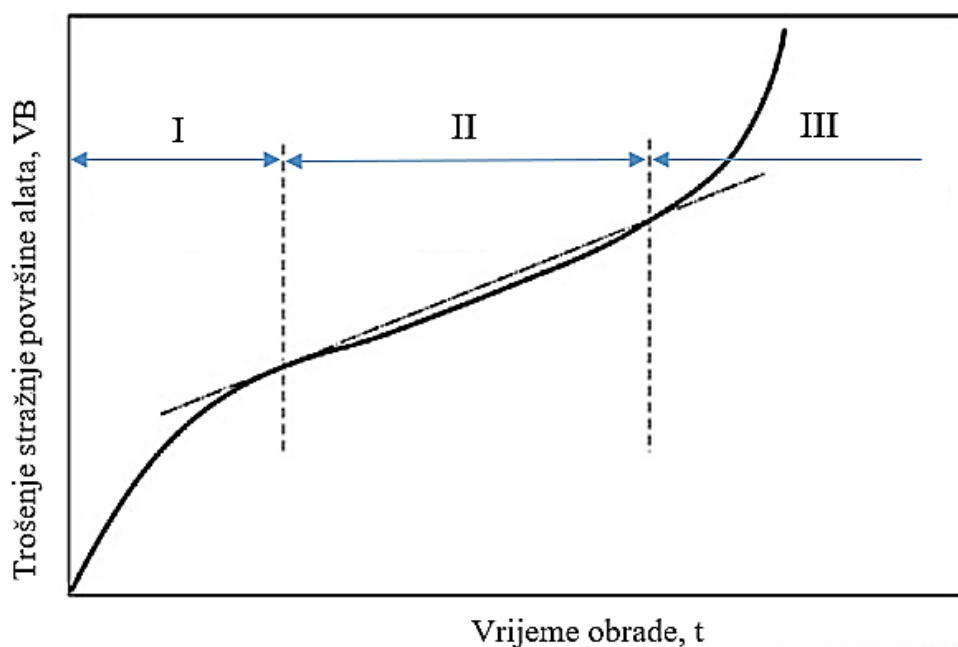


**Slika 43. Lom svrdla [17]**

### 3.3. Postojanost oštrice alata

Postojanost oštrice alata odnosno životni vijek alata vrlo je važan podatak u postupcima obrade odvajanjem. To je vrijeme tijekom kojeg alat može provesti u obradi prije nego postigne dozvoljenu istrošenost. Krivom procjenom tog vremena, može doći do značajnih povećanja troškova proizvodnje. Ukoliko će se alat prije mijenjati nego li je to potrebno, znači da će možda i troškovi proizvodnje biti veći zbog cijene alata. Ukoliko bi se mijenjao rjeđe nego bi to bilo potrebno, to bi dovelo do generiranja većeg broja otpadaka ili potrebe za doradom uslijed nedozvoljene hrapavosti površine obratka i dimenzija izvan tolerancija.

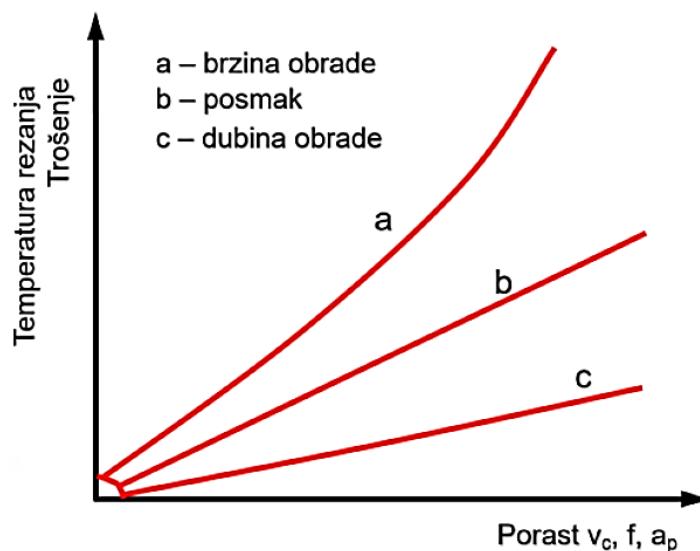
Na slici 44. prikazana je tipska krivulja trošenja reznih alata koja prikazuje promjenu trošenja stražnje površine alata u ovisnosti o vremenu obrade. Vrijedi za određenu kombinaciju alat-obradak i pri sljedećim uvjetima obrade:  $A = a_p \cdot f = konst.$ ,  $v_c = konst.$



**Slika 44. Tipična krivulja trošenja reznih alata [3]**

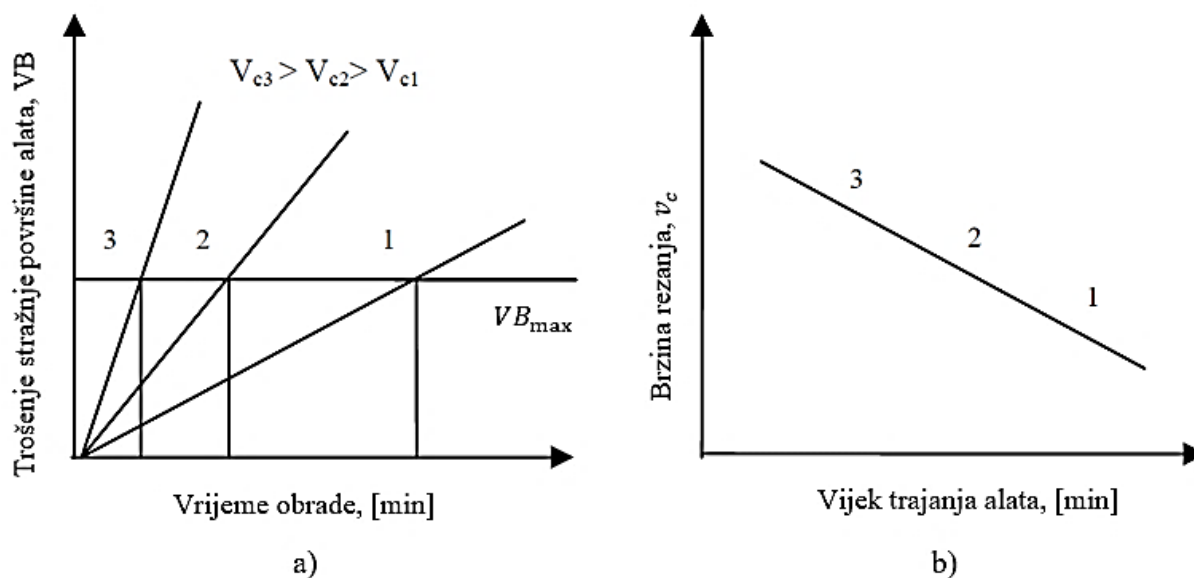
Prvi period trošenja, ili period uhodavanja, označava vrijeme u kojem se novi alat intenzivno troši, ali uz mali iznos trošenja. Kod drugog perioda trošenja, ili perioda normalnog trošenja, ovisnost trošenja o vremenu je pravocrtna (linearna). Treći period trošenja, ili period naglog trošenja, predstavlja kraj vijeka trajanja alata jer dolazi do povećanja temperatura prilikom obrade, sila i momenata što naposljetku može dovesti do loma alata.

Utjecaj parametara obrade na iznos trošenja i temperaturu rezanja prikazan je na slici 45. Sa slike je vidljivo da najveći utjecaj na iznos trošenja alata ima brzina rezanja, zatim posmak, dok dubina rezanja ima najmanji utjecaj.



**Slika 45. Utjecaj parametara obrade na iznos trošenja i temperaturu rezanja [19]**

Trošenje stražnje površine alata se često koristi kao kriterij za određivanja vijeka trajanja alata zbog njegovog utjecaja na hrapavost obrađene površine i dimenzijsku točnost izratka. Na slici 46a. su prikazane tipske krivulje trošenja za tri različite brzine rezanja dok je na slici 46b. prikazana ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja. Što je brzina rezanja veća to vijek trajanja alata kraći.

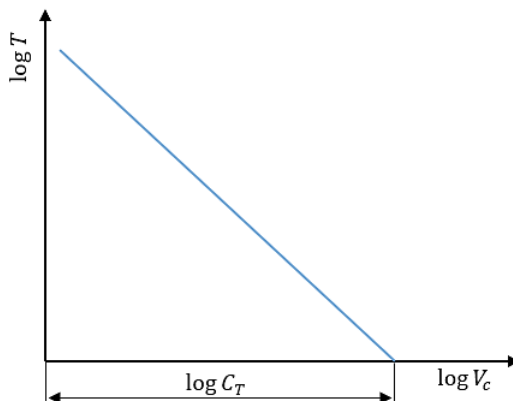


**Slika 46. Tipične krivulje trošenja (a), ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja (b) [20]**

Na slici 46b. vidljivo je da je ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja linearna, što je Taylor matematički zapisao u sljedećem obliku:

$$v_c T^m = C_T \quad (3.1)$$

gdje je  $v_c$  brzina rezanja,  $T$  vijek trajanja alata,  $m$  eksponent Taylorove jednadžbe, a  $C_T$  Taylorova konstanta. Fizikalni smisao konstante  $C_T$  je da predstavlja brzinu rezanja pri kojoj bi postojanost alata iznosila jednu minutu, odnosno jednu vremensku jedinicu. Grafički prikaz te konstante vidljiv je slici 47.



**Slika 47. Grafički prikaz Taylor-ove jednadžbe**

Gore navedeni izraz vrijedi za alate izrađene od visoko ugljičnih čelika i brzoreznih čelika [20]. S vremenom su se počeli koristiti i drugi materijali za izradu alata te je utjecaj posmaka i dubine rezanja na postojanost oštrice alata sve veći. Stoga se počinje koristiti prošireni oblik Taylorove jednadžbe:

$$v_c = C_T \cdot a_p^x \cdot f^y \cdot T^z \quad (3.2)$$

gdje je  $a_p$  dubina rezanja,  $f$  posmak, a eksponenti  $x, y, z$  ovise o uvjetima obrade.

Postoje tri mogućnosti definiranja postojanosti oštrice alata [19]:

1. Postojanost definirana vremenom u kojem alat može provesti u obradi prije nego dođe do istrošenja koje je definirano kao dozvoljena istrošenost alata (kriterijsko trošenje).
2. Postojanost definirana duljinom puta u smjeru glavnog gibanja alata. Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka provlačenja, dok kod drugih postupaka obrade odvajanjem uglavnom nije u primjeni.
3. Postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja. Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka bušenja te će se stoga on detaljnije objasniti.



Duljina puta  $L_f$  u smjeru posmičnog gibanja definirana je kao umnožak posmične brzine  $v_f$  i vremena postojanosti oštrice alata  $T$ :

$$L_f = v_f \cdot T \quad (3.3)$$

Izraz za posmičnu brzinu glasi:

$$v_f = f \cdot n \quad (3.4)$$

Izraz za učestalost vrtnje glasi:

$$n = \frac{v_c}{D \cdot \pi} \quad (3.5)$$

Uvrštavanjem izraza 3.4 i 3.5 u izraz 3.3, dobije se:

$$T = L_f \cdot \frac{D \cdot \pi}{v_c \cdot f} \quad (3.6)$$

Slijedi sređivanje izraza 3.6:

$$v_c \cdot \left( L_f \cdot \frac{D \cdot \pi}{v_c \cdot f} \right)^m = C_T \quad (3.7)$$

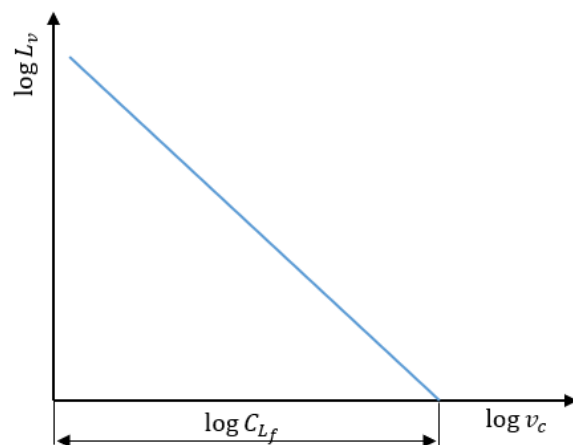
$$v_c^{1-m} \cdot L_f^m = C_T \cdot \left( \frac{f}{D \cdot \pi} \right)^m \quad (3.8)$$

$$C_T^{\frac{1}{1-m}} \cdot \left( \frac{f}{D \cdot \pi} \right)^{\frac{m}{1-m}} = C_{L_f} \quad (3.9)$$

Usvajanjem  $\frac{m}{1-m} = m_f$  dobije se:

$$v_c \cdot L_f^{m_f} = C_{L_f} \quad (3.10)$$

gdje je  $m_f$  Taylor-ov eksponent, a  $C_{L_f}$  Taylor-ova konstanta. Fizikalni smisao konstante  $C_{L_f}$  je brzina rezanja pri kojoj bi postojanost alata iznosila 1 m puta u smjeru posmičnog gibanja. Na slici 48. je kvantitativno prikazana postojanost oštrice alata izražene duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja u ovisnosti o brzini rezanja u logaritamskim koordinatama.



**Slika 48.** Grafički prikaz Taylor-ove jednadžbe za postojanost definiranu duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja



### 3.4. Nadzor istrošenosti alata

Sustav nadzora alata (*Engl. Tool Condition Monitoring, TCM*) je vrlo važan aspekt kod održavanja kvalitete proizvoda proizvedenih bilo kojim postupkom obrade. Implementacija pouzdanog sustava nadzora alata omogućila bi, prema [35], sljedeće beneficije:

- Zastoji u radu prouzrokovani lomom alata i moguće posljedične štete na stroju bili bi spriječeni. Ovo je vrlo važno iz ekonomskog aspekta budući da troškovi zastoja mogu biti značajni u usporedbi s cijenom alata.
- Izbjegla bi se prijevremena zamjena ili prekomjerna upotreba alata
- Smanjila bi se količina nesukladnih izradaka i izradaka koji moraju na doradu
- Sustav nadzora alata neophodan je u proizvodnji bez čovjeka (*Engl. Unmanned machining*) i fleksibilnoj automatiziranoj proizvodnji (*Engl. Flexible automated manufacturing*)
- Moguća optimizacija procesa obrade

Kako bi se pratilo stanje u kojem se nalazi alat, potrebno je mjeriti razne signale pomoću mjernih sustava koji moraju zadovoljiti sljedeće kriterije [36]:

- Visoki stupanj osjetljivosti u različitim uvjetima obrade
- Veliku otpornost na nečistoće, čestice odvojene rezanjem, te mehaničke, elektromagnetske i toplinske utjecaje
- Mogućnost prigušenja šumova
- Jednostavnu građu uz malu potrebu za održavanjem
- Jednostavnu integraciju u postojeće strukture obradnih strojeva

Također, njihova ugradnja ne bi smjela utjecati na smanjenje statičke, odnosno dinamičke krutosti i radnog prostora.

Sustavi nadzora se najčešće dijele prema načinu prikupljanja podataka, a oni mogu biti prikupljeni direktno i indirektno. Metode direktnog nadzora najčešće uključuju mjerenja povezana s volumenskim gubitkom materijala alata, a za to se najčešće primjenjuju industrijske kamere s odgovarajućim objektivima. Mjerenja se mogu izvršiti samo kada se alat nalazi izvan obrade, a dva glavna nedostatka ovih metoda su: povećava se vrijeme stajanja stroja (izvan obrade) i ne može se detektirati lom alata tijekom procesa obrade. Nedostaci i poteškoće implementacije direktnih metoda nadzora, dovele su do istraživanja indirektnih metoda kod kojih se pokušalo odrediti trošenje alata za vrijeme obrade, pri tome mjereći parametre koji su usko povezani s trošenjem alata. Neki od mjerenih parametara su: sile, jakosti struja glavnih i posmičnih motora, vibracije, akustične emisije, temperatura, hrapavost površine obratka i dr.

## 4. SREDSTVO ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE

Kao što je ranije navedeno, trošenje alata je posljedica mehaničkog, toplinskog ili kemijskog utjecaja na sam alat. Upravo intenzitet tih utjecaja se može smanjiti korištenjem sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, ili skraćeno SHIP (*engl. cutting fluids, cooling lubrication fluid, coolant*). Svrha njihove uporabe su prema [2]:

- Podmazivanje površine alata na kojima se razvija trenje
- Hlađenje alata i obratka, čime se sprečava povećanje temperature i usporava proces trošenja alata (ili omogućuje obrada većim brzinama)
- Odvođenje (ispiranje) odvojenih čestica i prašine s alata i obratka, čime se smanjuje trošenje alata i poboljšava kvaliteta obrađene površine
- Smanjenje sila rezanja
- Kemijska zaštita obrađene površine od štetnog djelovanja okoline (zbog toga SHIP treba imati antikorozijska svojstva)

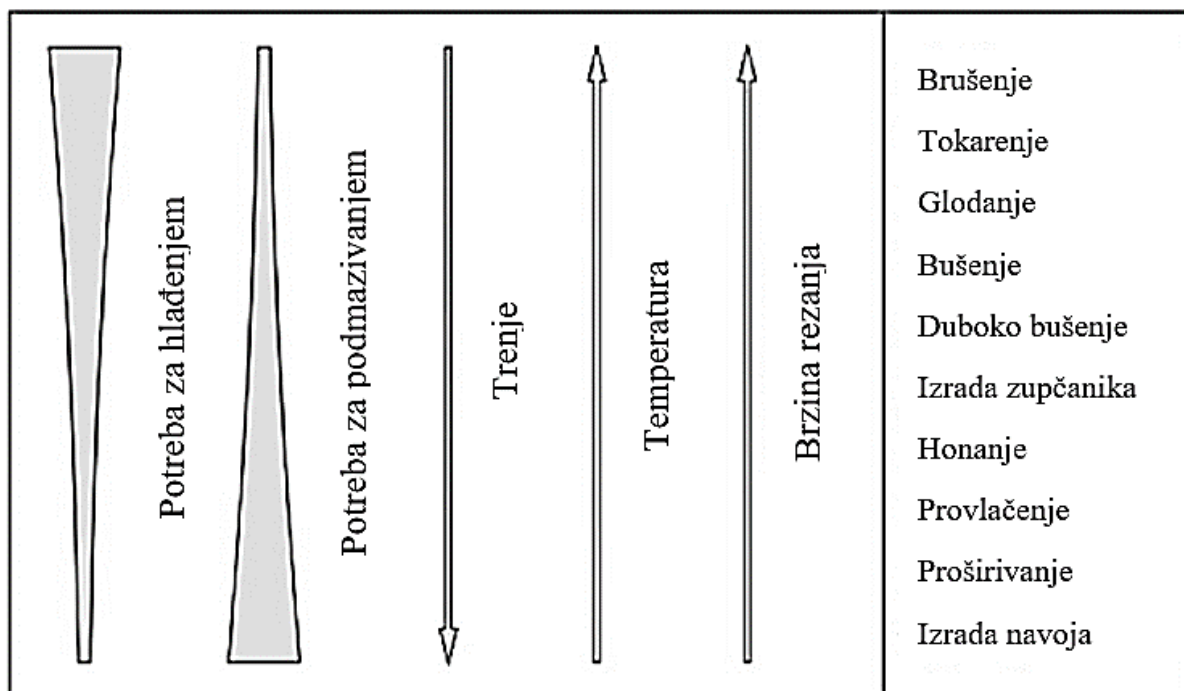
Uz mnogo gore navedenih prednosti primjene SHIP-a, dakako da postoje i nedostaci njihove primjene. Sama primjena SHIP-a rezultira povećanjem troškova u pogledu cijene nabave, ali i cijene njihova zbrinjavanja zbog ekološkog aspekta.

### 4.1. Uvjeti za pravilan izbor SHIP-a

Pravilan izbor SHIP-a često ovisi o uvjetima odnosno funkcijama koje se prema važnosti mogu podijeliti na primarne i sekundarne. Glavne funkcije su:

- Hlađenje – odvođenje topline s alata, obratka i stroja
- Podmazivanje – smanjenje trenja između alata i materijala, smanjenje sila rezanja, smanjenja afiniteta između materijala obratka i alata

Koja od glavnih funkcija je važnija za određeni slučaj primjene, ovisi o samoj vrsti procesa obrade. Sa slike 49. vidljivo je kako veću važnost ima funkcija podmazivanja kod postupaka izrade zupčanika, honanja, provlačenja, proširivanja i izrade navoja. Kod navedenih postupaka razvijaju se veće brzine rezanja i temperature, dok je trenje zanemarivo u odnosu na drugu skupinu procesa obrade. Funkcija hlađenja bitnija je kod postupaka brušenja, tokarenja, glodanja, bušenja i dubokog bušenja. Također postoji i međuovisnost između dvije primarne funkcije SHIP-a. Na primjer smanjenjem trenja dolazi i do smanjenja udjela uložene snage koja će se pretvoriti u toplinu, a samim time i obradak će se manje zagrijati.



**Slika 49. Potreba za hlađenjem ili podmazivanjem kod različitih postupaka obrade odvajanjem [3]**

Također uz primarne funkcije, velik utjecaj na izbor SHIP-a ovisi i o sekundarnim funkcijama kao što su: odvođenje odvojene čestice, zaštita površine obratka, utjecaj na radnika, zaštita stroja, otpornost na starenje, razgradivost itd.

#### 4.2. Vrste

Prema [3], SHIP se ovisno o agregatnom stanju može podijeliti na:

- Monofazni SHIP – plinovi i tekućine
- Višefazni SHIP – emulzije, mješavina plinova i tekućina

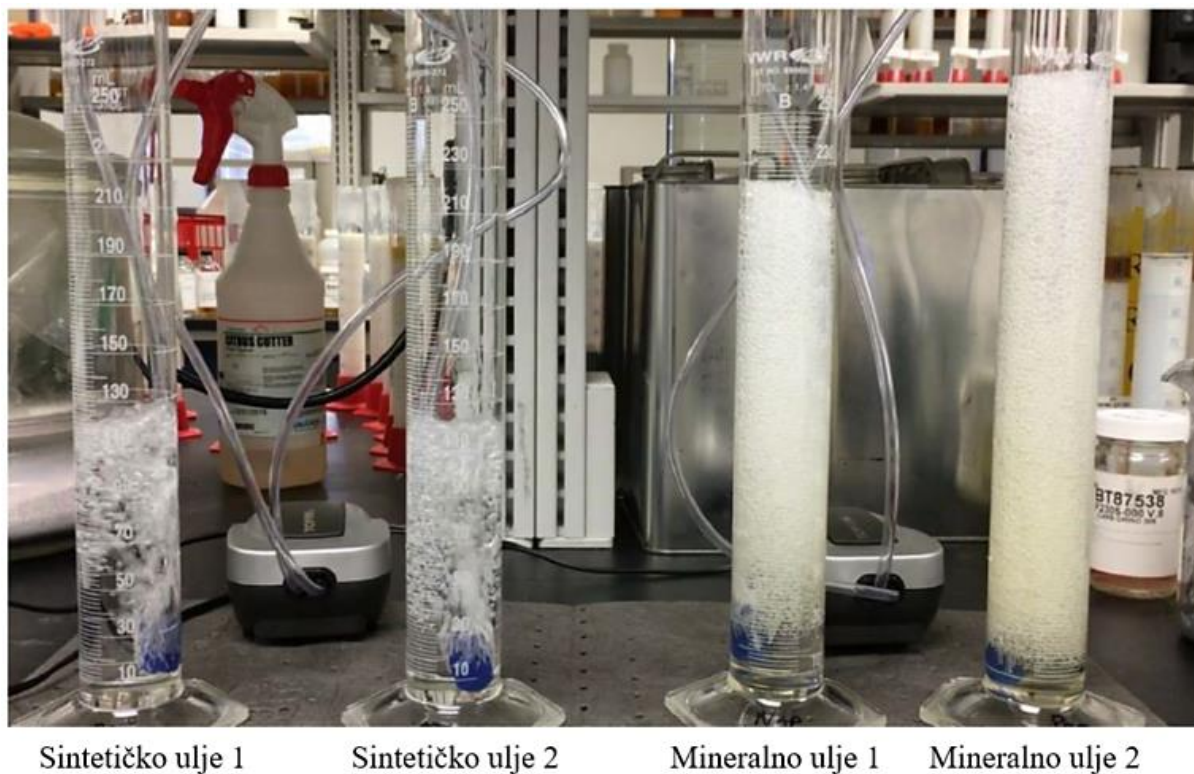
SHIP u obliku tekućina je najčešća vrsta koja se primjenjuje u proizvodnji, a može se podijeliti na SHIP koji se miješa s vodom i na SHIP koji se ne miješa s vodom. U novije vrijeme, s povećanjem svjesnosti očuvanja okoliša, sve se više razvijaju obrade kod kojih se koriste minimalno potrebne količine SHIP-a u obliku tekućine (*engl. nearly dry machining*) ili potpuno suhe obrade (*engl. dry machining*) uz eventualnu primjenu plinova, najčešće komprimiranog zraka, kako bi se pospješilo odvođenje odvojene čestice.

#### 4.2.1. SHIP u obliku tekućine koji se ne miješa s vodom

Ova vrsta SHIP-a ima izrazito dobra svojstva podmazivanja i zaštitu od korozije, ali vrlo slabo svojstvo hlađenja. U ovu skupinu pripadaju mineralna (najčešće u upotrebi), biljna i životinjska ulja, petrolej i sl. Kod primjene ulja u svojstvu SHIP-a, potrebno je pritom zadovoljiti slijedeće uvjete [3]:

- Strojevi moraju biti jako dobro zabrtvljeni, kako ne bi došlo do ispuštanja ulja i uljne magle ili do isparavanja ulja.
- Strojevi moraju biti opremljeni s uređajima koji uklanjaju uljnu maglu
- Općenito, izradak se treba nakon obrade oduljiti

U mineralna ulja pretežno ne treba dodavati inhibitore korozije, međutim potrebno je dodati inhibitore koji sprečavaju pjenjenje. Pjenjenje nepovoljno djeluje na primarno svojstvo ove skupine SHIP-a, a to je podmazivanje. Na slici 50. vidljivo je kako mineralna ulja imaju izrazitu tendenciju ka pjenjenju, dok se sintetska ulja (ulja u kojima su dodani inhibitori) gotovo ili u potpunosti ne pijene.



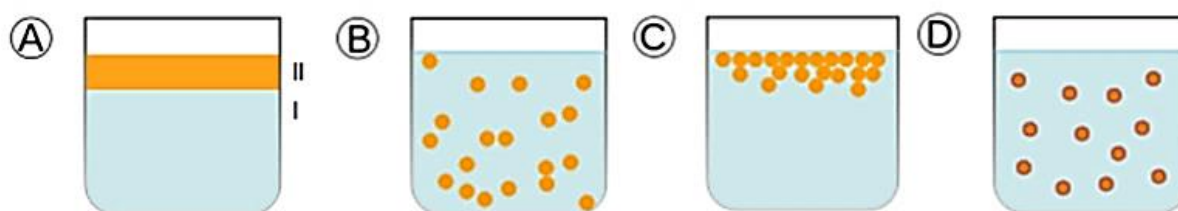
Slika 50. Pjenjenje kod mineralnih i sintetičkih ulja [21]

Viskoznost, koja se opisuje kao unutarnje trenje tekućine i njezin otpor prema tečenju kada se nalazi pod djelovanjem sile smicanja [11], je najvažnije svojstvo ulja. Viskoznost mora biti dovoljno visoka kako bi se ostvarila dobra adhezija odnosno prionjivost na površinu i smanjilo stvaranje uljne magle. Međutim, viskoznost ne smije biti ni previsoka. U tom slučaju ulje teže dolazi do željenog položaja, npr. površina dodira alata i odvojene čestice, te to može dovesti do neželjenog povećanja temperature alata ili obradka. Trajnost ove skupine SHIP-a je vrlo velika.

#### 4.2.2. SHIP u obliku tekućine koji se miješa s vodom

Uslijed većeg toplinskog kapaciteta i koeficijenta provođenja topline, SHIP u obliku tekućine koji se miješa s vodom ima bolja svojstva hlađenja od SHIP-a u obliku tekućine koji se ne miješa s vodom. Ovu skupinu se jednostavnije naziva „emulzije“. Prema [3], otprilike u 90% slučajeva se koristi ova skupina SHIP-a. Najčešće se koristi kod obrade čelika, lijevanog željeza i aluminijskih legura. Ova skupina ima primarno svojstvo hlađenja, a sekundarno (samo djelomično) svojstvo podmazivanja.

Pod pojmom emulzija se smatra smjesa dviju nemješivih tekućina, najčešće vode i mineralnog ulja, koja se vrlo brzo nakon miješanja ponovo razdvaja na svoje prvobitne komponente. Stoga, kako bi emulzija postala stabilna, potrebno je dodati emulgator. Emulgator je tvar koja raspršuje jednu supstancu u drugoj u obliku sitnih kapljica kao što je prikazano na slici 51.



- A – dvije tekućine koje ne mogu činiti stabilnu smjesu  
B – miješanje tekućina  
C – ponovno odvajanje (nema emulgatora)  
D – stabilna emulzija s emulgatorom

Slika 51. Emulzija [22]

Emulzije imaju manju sposobnost prijanjanja na površinu alata ili obratka, a dugotrajnost ovisi o kvaliteti sustava filtriranja. Emulzije s većim udjelom emulgatora imaju veću tendenciju k pjenjenju te lošija svojstva hlađenja i podmazivanja od emulzija s manjim udjelom emulgatora. Minimalni udio ulja u emulziji iznosi 2% [3], a njegovim povećanjem dolazi do povećanja kvalitete podmazivanja i korozijske zaštite. Prilikom odabira emulzije potrebno je obratiti pozornost na sljedeće:

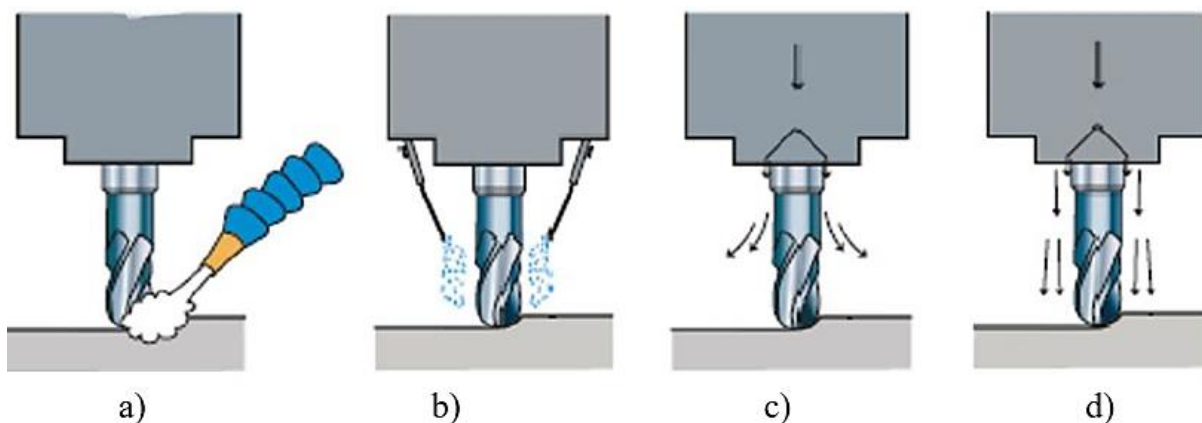
- Udio ulja mora biti dovoljan za učinkovito podmazivanje
- Udio vode mora biti dovoljno velik kako bi se osiguralo učinkovito hlađenje
- Povećanjem udjela ulja dolazi do povećanja cijene nabave emulzije

Tijekom uporabe potrebno je stalno nadzirati sastav emulzije jer s vremenom dolazi do pada udjela ulja. Ulje se zadržava na alatu, obratku, odvojenoj čestici i stroju. Također postoji šansa da se u emulziji razviju neki mikro organizmi koji mogu smanjiti antikorozijska svojstva emulzije. Glavna mana primjene emulzija je cijena njihovog odlaganja. Kako ne bi došlo do zagađenja okoliša, emulzija se mora odvojiti posebno na vodu, a posebno na ulje.

#### 4.3. Način dovodenja

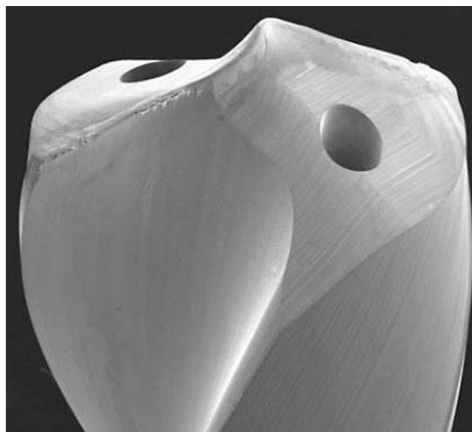
Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje se prema [2] može dovoditi na sljedeće načine:

- Slobodni mlaz – obilna količina SHIP-a „izvana“ (slika 52a.)
- Pod niskim pritiskom – uljna magla (slika 52b.), ulja, emulzije
- Pod visokim tlakom – obilna količina SHIP-a „iznutra“ (slika 52c.)
- U struji stlačenog zraka (slika 52d.)



Slika 52. Način dovodenja SHIP-a [2]

Početak primjene SHIP-a u obradi odvajanjem čestica, koristilo se dovođenje u obliku slobodnog mlaza. S vremenom se uvidjelo da npr. kod bušenja, unutarnjeg tokarenja, nekih načina glodanja i dr., SHIP nije moguće dovesti na željenu lokaciju. Svojstva hlađenja, podmazivanja i ispiranja u tom slučaju nisu jednaka mogućnostima SHIP-a. Stoga je došlo do razvoja alata, ali i strojeva kod kojih je moguća dobava SHIP-a kroz sam alat. Primjer jednog takvog svrdla dan je na slici 53.

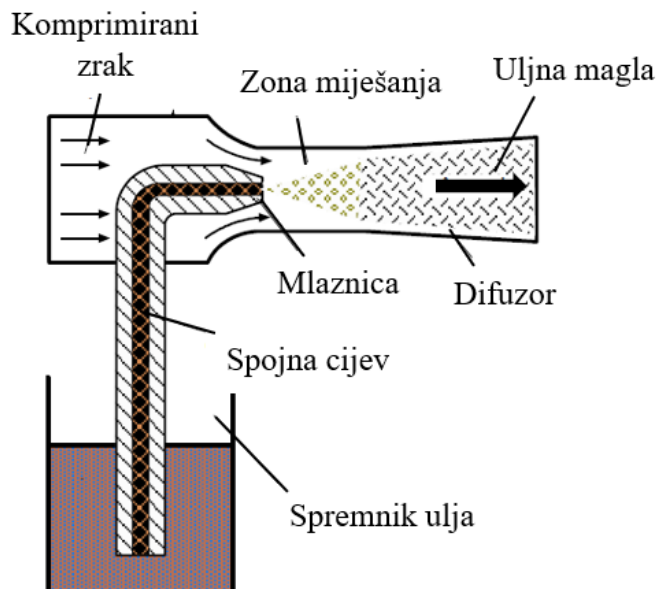


**Slika 53. Primjer svrdla koje ima mogućnost dobave SHIP-a kroz sam alat [3]**

Razvojem svijesti o štetnosti odlaganja SHIP-a u obliku tekućina u prirodu, došlo je do postroženja propisa kako se isti mora zbrinuti, što je dovelo do povećanja troškova zbrinjavanja. Također je dokazano da pojedine vrste ulja i emulzija imaju štetno djelovanje na čovjeka. Gore navedeni razlozi doveli su do razvoja obrada kod kojih se koristi komprimirani zrak, uljna maglica ili se uopće ne koristi SHIP, ali pritom treba napomenuti kako se ovi načini obrade koriste kada je dovoljno minimalno hlađenje.

#### **4.3.1. Uljna magla**

Uljna magla se koristi kod takozvane skoro-suhe obrade (*engl. Near Dry Machining*) ili obrade s minimalnom količinom SHIP-a (*engl. Minimum Quantity Lubrication Systems*). U sustavu je potrebno imati raspršivač, prikazan na slici 54., koji raspršuje ulje u struji komprimiranog zraka. Nastala uljna magla pod niskim tlakom dolazi do zone obrade. Princip raspršivača temelji se na Venturijevoj cijevi. U suženom presjeku cijevi tlak je niži zbog povećanja brzine strujanja te dolazi do „vučenja“ ulja iz spremnika. Na izlazu iz mlaznice ulje se raspršuje u fine čestice te u struji komprimiranog zraka izlazi iz raspršivača.



Slika 54. Raspršivač [23]

U tablici 1. prikazane su prednosti i nedostaci primjene uljne magle .

Tablica 1. Prednosti i nedostaci primjene uljne magle

PREDNOSTI	NEDOSTACI
Niska cijena ugradnje na postojećim strojevima	Neučinkovitost primjene kod bušenja i ostalih oblika glodanja
Nema potrebe za korištenjem specijalnih alata	Nemogućnost postizanja jednakih uvjeta podmazivanja, hlađenja i ispiranja tijekom cijelog procesa obrade
Lako upravljanje i održavanje	Sastav uljne magle treba se prilagoditi postupku i materijalu obrade
Oprema se može premještati s jednog stroja na drugi	Štetnost za čovjeka
Položaj raspršivača se može mijenjati	Zapaljivost
Razne izvedbe mlaznica za različite postupke obrade	
Vrlo učinkovita metoda kod čeonog glodanja i piljenja	

Posljednjih godina došlo je razvitka primjene uljne magle gdje se umjesto komprimiranog zraka koristi ugljični dioksid (*engl. Advanced Nearly-Dry Machining, ANDM*). Time se postiglo da uljna magla nije zapaljiva te se stoga mogu razvijati i veće temperature na alatu, obratku i odvojenoj čestici.



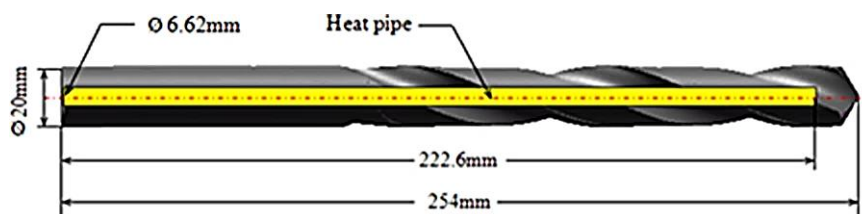
### 4.3.2. Suha obrada

Obrada kod koje se ne koriste ulja i emulzije naziva suha obrada (*engl. Dry Machining*). Ovaj način obrade je najbolji u pogledu zaštite okoliša i zdravlja čovjeka, a glavne prednosti su prema [23]:

- Ne dolazi do zagađenja okoliša. Kod tzv. „mokrih obrada“ (*engl. Wet Machining*) dolazi do zagađenja okoliša uslijed odlaganja SHIP-a, zagađenja voda te kontaminacije zemlje.
- Tijekom obrade odvajanjem dolazi do generiranja značajnih količina odvojenih čestica. U praksi se preporuča njihovo recikliranje. Kod „mokre“ obrade na odvojenoj čestici se zadržava SHIP te se on mora odvojiti skupim kemijskim postupcima. Kod suhe obrade nema tog dodatnog troška, a i za suhu odvojenu česticu se može dobiti više novca.
- Nema opasnosti od štetnog djelovanja na čovjeka (npr. u pogledu nadraživanja kože ili izazivanja alergijskih reakcija).
- Procjenjuje se da se oko 15% troškova obrade može propisati upotrebi SHIP-a, što je oko 3-4 puta više od troškova reznih alata. Uz SHIP su vezani troškovi odlaganja, skladištenja i održavanja sustava dok kod suhe obrade tih troškova nema.
- Ponekad, kod suhe obrade su potrebne manje sile rezanja nego kod „mokre“ obrade (kod visokobrzinskih obrada)
- Kada se rezna oštrica alata ne nalazi kontinuirano u zahvatu (npr. glodanje), kod „mokre“ obrade dolazi do „temperaturnog šoka“ što može smanjiti vijek trajanja oštrice.

Stoga su takvi načini obrade pogodniji za suhu obradu

Kod ovog načina obrade bilo je potrebno razviti dodatne mjere kako bi se ipak temperatura obrade držala u zadovoljavajućim granicama (svojstvo hlađenja), kako bi se smanjilo trenje (svojstvo podmazivanja) i kako bi se osiguralo adekvatno odvođenje odvojene čestice (ispiranje). Kako bi se smanjila količina generirane topline, razvijeni su alati s vlastitim hlađenjem. Jedan od primjera konstrukcije takve vrste alata dan je na slici 55.

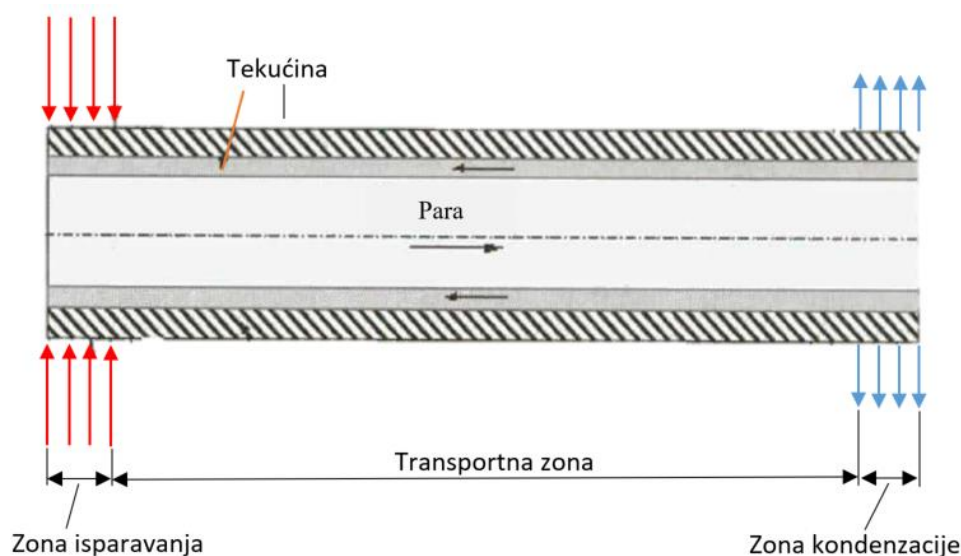


**Slika 55. Primjer svrdla s vlastitim hlađenjem [24]**

Ideja je da se umetne toplinska cijev (*engl. Heat-Pipe*) u središte alata. Na slici 56. je prikazan shematski prikaz cijevi u kojoj postoje tri zone: zona isparavanja, transportna (adijabatska) zona i zona kondenzacije. Kako se tijekom obrade razvijaju visoke temperature, dolazi do

isparavanja rashladnog sredstva unutar alata. Uslijed isparavanja dolazi do povećanja tlaka, taj tlak potiskuje paru prema zoni kondenzacije. Nakon što se medij pretvori u tekuće agregatno stanje, on se vraća nazad prema vrhu svrdla uslijed svojstva kapilarnosti.

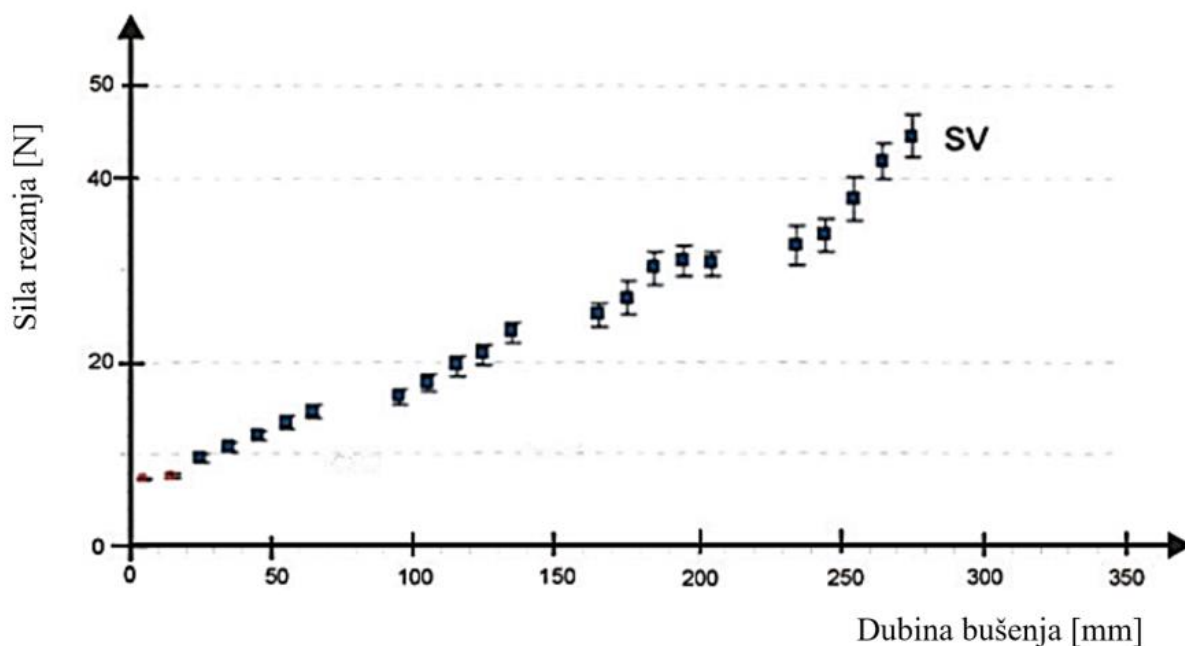
Kako bi se smanjilo trenje između alata i obrađene površine ili alata i odvojene čestice, koriste se meke prevlake. Takve prevlake se nazivaju samo-podmazujuće prevlake (*engl. self-lubricating coatings*), a neke od njih su: molibden sulfid ( $\text{MoS}_2$ ), molibden nitrid ( $\text{Mo}_2\text{N}$ ) te keramički kompoziti. Kako bi se povećala učinkovitost odvođenja odvojene čestice koristi se komprimiran zrak koji se dovodi izvan ili unutar alata.



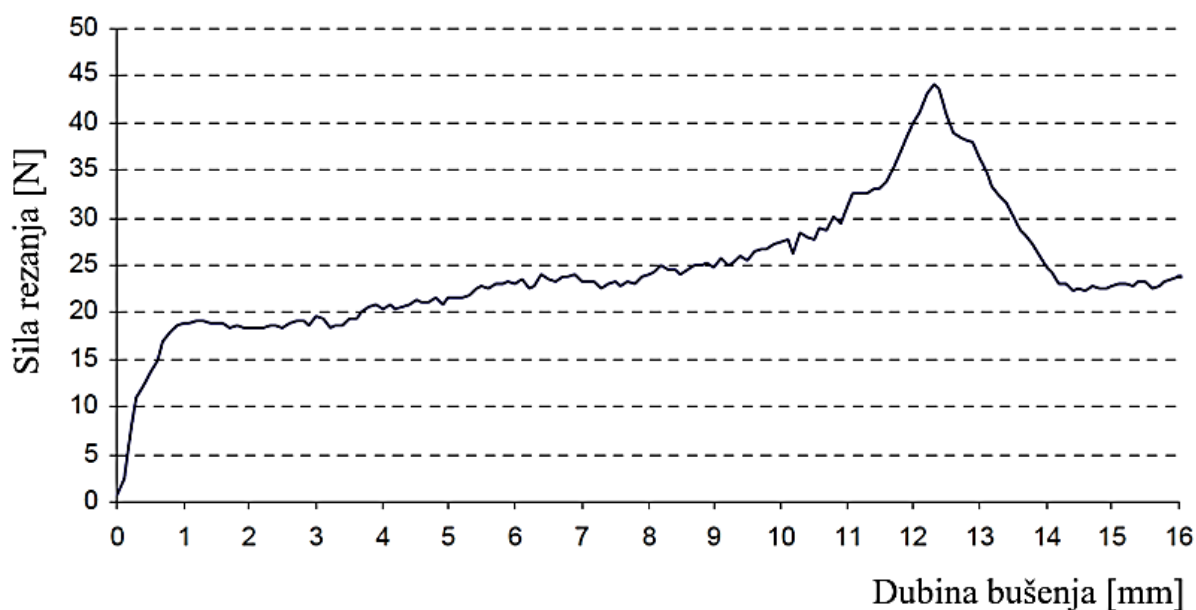
Slika 56. Shematski prikaz toplinske cijevi [24]

#### 4.4. Važnost SHIP-a kod bušenja kamena

Prilikom bušenja kamena, odvojena čestica ima oblik praha. Upravo taj oblik odvojene čestice uzrokuje opasnost od nakupljanja odvojene čestice u provrtu prilikom povećanja dubine bušenja. Pritom dolazi do povećanja sile rezanja, zagrijavanja svrdla i na posljetku do njegovog intenzivnijeg trošenja. Na slici 57. prikazan je odnos sile rezanja o dubini prilikom bušenja pješčenjaka (vrsta kamena). Sila rezanja se gotovo linearno mijenja s povećanjem dubine bušenja. Povećanje sile rezanja još je drastičnije ukoliko se buši u puno, u odnosu na proširivanje provrta [25]. Kako bi se spriječilo nagomilavanje odvojene čestice preporuča se upotreba SHIP-a u obliku tekućine (ispiranje) ili komprimiranog zraka (ispuhivanje). Na slici 58. prikazan je dijagram sile rezanja – dubina bušenja u jednom takvom slučaju. Na njoj se vidi kako je sila rezanja značajno pala prilikom uključivanja komprimiranog zraka na dubini od 12 mm.



Slika 57. Odnos sile rezanja i dubine prilikom bušenja pješčenjaka [25]



Slika 58. Odnos sile rezanja o dubini bušenja uz uključivanje komprimiranog zraka na dubini od 12 mm [26]

Upravo ova problematika detaljnije je objašnjena u eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada. Provedeni su testovi učinkovitosti korištenja procesa ispuhivanja kroz sam alat tijekom bušenja kamena te njegov utjecaj na istrošenost rezne oštrice, smanjenje aksijalne sile i jakosti struja pogonskih motora.

## 5. ELEKTRO-EROZIJSKA OBRADA ŽIGOM

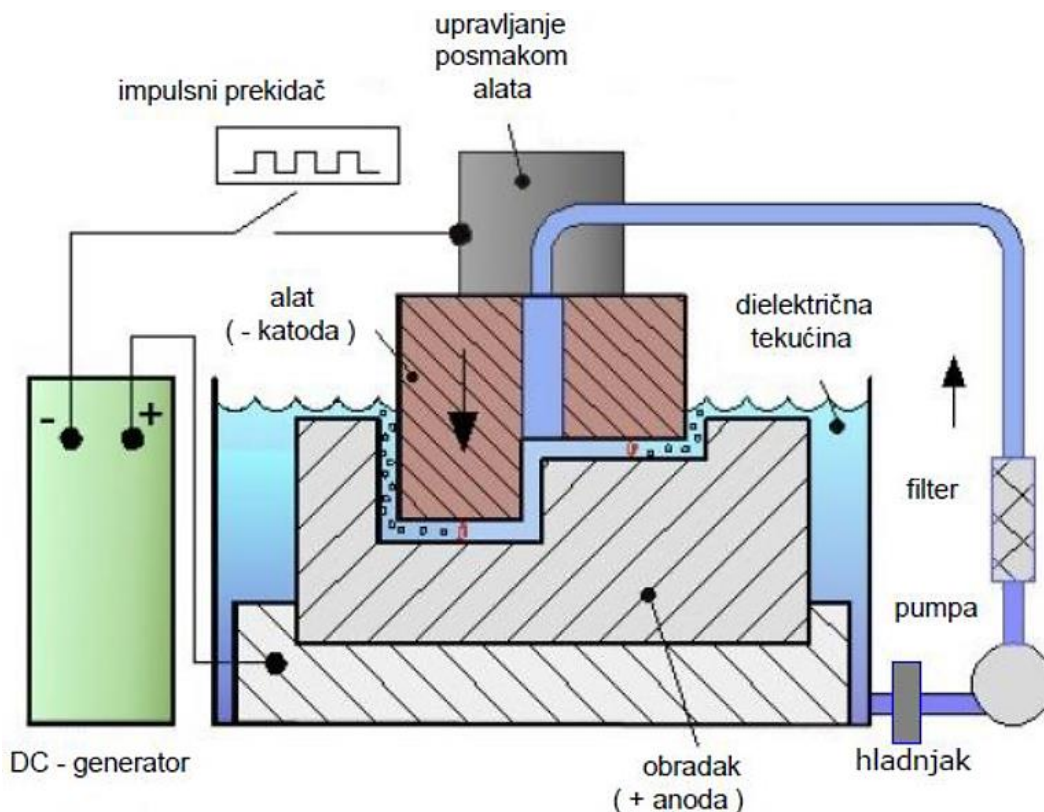
Težnja za ostvarivanjem svih prednosti primjene SHIP-a kod postupaka obrade gdje se SHIP ne može dovesti na optimalno mjesto, dovela je do razvoja alata kod kojih se SHIP dovodi kroz alat. Karakterističnost provrta je velika dubina i vrlo mali promjer, te je stoga nemoguće izraditi takav alat s nekim od konvencionalnih postupaka obrade. U tu svrhu primjenjuje se postupak zvan elektroerozijska obrada žigom (*engl. Sinker Electrical Discharge Machining, Sinker EDM, Ram EDM*). Prednosti i nedostaci ovog postupka obrade dani su u tablici 2.

**Tablica 2. Prednosti i nedostaci EDM-a**

PREDNOSTI	NEDOSTACI
Nema kontakta između alata i obratka, stoga nema generiranja sila rezanja. Time je omogućena izrada sitnih i krhkih predmeta	Moguća obrada samo elektrovodljivih materijala
Izradak nema oštih bridova (u nekim slučajevima može biti i nedostatak)	Skuplji postupak izrade u odnosu na konvencionalne postupke poput tokarenja i glodanja
Moguća izrada proizvoda s kompleksnom geometrijom	Manja proizvodnost od konvencionalnih postupaka
Moguća izrada predmeta u uskim tolerancijama	Kompleksna izrada alata
Zadovoljavajuća hrapavost površine	Potrošnja veće količine električne energije
Tvrdoća obratka ne utječe na proces obrade	U obratku mogu ostati zaostala naprezanja

### 5.1. Princip rada

Kako i sam naziv govori, radi se o postupku odvajanja metala koji se temelji na principu erozije materijala uslijed iskrenja između alata i obratka koji su potopljene u dielektričnu tekućinu. Alat (katoda) i obradak (anoda) su dvije elektrode spojene na izvor istosmjerne struje. Alat ima oblik željenog profila koji želimo dobiti na obratku. Između obratka i alata postoji razmak kako bi se omogućilo pulsirajuće iskrenje. Na mjestu preskakanja iskre dolazi do zagrijavanja, taljenja i isparavanja materijala obratka. Princip rada prikazan je na slici 59.



**Slika 59. Princip elektroerozijske obrade žigom [2]**

Isparavanjem materijala obratka dolazi do povećanja razmaka između alata i obratka. Kako bi se održao konstantan razmak, a time i kontinuitet obrade (sprječavanje kratkog spoja) alat se mora gibati određenom posmičnom brzinom. Ukoliko je razmak manji, intenzitet obrade se smanjuje zbog povećanja frekvencije pojave iskri čime se smanjuje energija koju posjeduje svaka iskra pojedinačno [28]. Ukoliko alat vibrira, razmak između alata i obratka se povećava i smanjuje naizmjenično, postiže se periodičnost iskrenja te se time ostvaruje željeni intenzitet obrade.

## 5.2. Dielektrična tekućina, alat

Dielektrična tekućina ima važnu ulogu u odvijanju procesa EDM-a. Neke od njenih funkcija su:

- Ostaje električni ne-vodljiva (izolator) do trenutka postizanja potrebnog napona na alatu
- Mora odmah omogućiti pražnjenje odnosno iskrenje kod postizanja potrebnog napona na alatu
- Odnosenje produkata izgaranja u neprestanom strujanju (mora se filtrirati)
- Hlađenje alata/obratka (mora se hladiti)

Kako bi ispunjavala gore navedene funkcije, dielektrična tekućina mora imati sljedeća svojstva [28]: dobra izolacijska svojstva do trenutka postizanja potrebnog napona, visoka temperatura zapaljenja, mala viskoznost, kemijski neutralna zbog sprječavanja nastanka korozije, ne toksičnost, nizak intenzitet raspadanja tijekom dugog vremenskog perioda i niska cijena. Tekućine koje imaju gore navedena svojstva i koje se najčešće primjenjuju u postupku EDM žigom su ugljikovodična i mineralna ulja.

Točnost obrade uvelike ovisi o alatu (elektrodi). Kao elektroda se može koristiti bilo koji elektrovodljivi materijal, međutim tijekom obrade dolazi i do erozije alata. Stoga se koriste materijali [28] koji imaju omjer trošenja obratka i alata u granicama od 5: 1 do 100: 1. Također, bi elektroda trebala biti izrađena iz materijala koji ima visoku temperaturu tališta i isparavanja, dobro provodi toplinu, lako se oblikuje, otporan je na trošenje i cijenom je prihvatljiv. Najčešći materijal za izradu elektroda je grafit iz razloga jer vrlo otporan na trošenje, ima dobru električnu vodljivost, relativno lako se oblikuje, ali ima višu cijenu. U tablici 3. su prikazani i drugi najčešći materijali alata s pripadajućim karakteristikama.

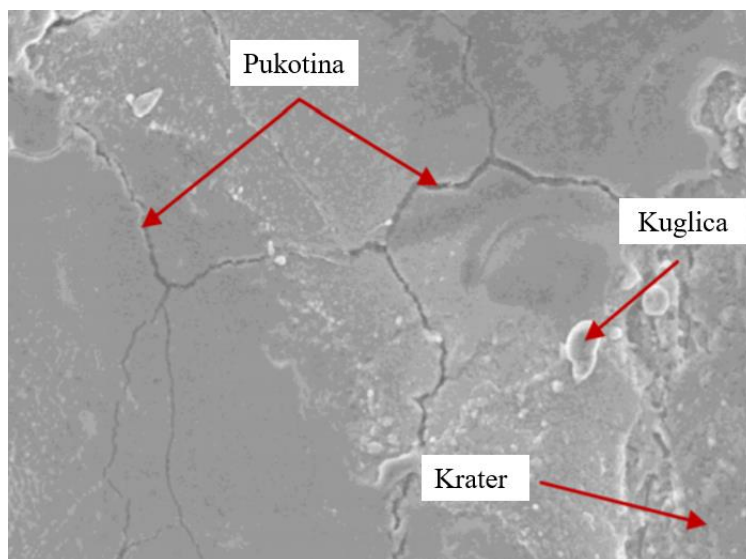
**Tablica 3. Materijali za izradu alata/elektrode s pripadajućim karakteristikama [28]**

Materijal	Količina odvojenog materijala	Omjer trošenja alata i obratka	Izrada	Cijena	Primjena
Grafit	Velika	Mali	Laka	Visoka	Svi metali
Bakar	Velika kod grube obrade	Mali	Laka	Visoka	Svi metali
Mesing	Velika kod grube obrade	Visoki	Laka	Niska	Svi metali
Volfram	Mala	Mali	Teška	Visoka	Manji provrti
Legure volframa i bakra	Mala	Mali	Teška	Visoka	Precizni dijelovi
Lijeivano željezo	Mala	Mali	Laka	Niska	Zabranjeno
Čelik	Mala	Visoki	Laka	Niska	Završna obrada
Legure cinka	Velika kod grube obrade	Visoki	Laka	Niska	Svi metali



### 5.3. Karakteristike obrade i primjena

Obradena površina dobivena EDM postupkom, primjer prikazan na slici 60., može sadržavati kratere, kuglice i pukotine. Veličina kratera ovisi o energiji koju iskra posjeduje. Krater je veći i dublji što je veća energija koju iskra posjeduje te se time dobiva veća hrapavost površine, što kod nekih slučajeva može rezultirati nesukladnim proizvodom. Do pojave kuglica na površini dolazi uslijed



**Slika 60. Izgled obrađene površine dobivene postupkom EDM-a [29]**

priljepljivanja odvojene čestica na površinu. Tijekom postupka obrade, energija iskre se pretvara u toplinu te dolazi do zagrijavanja, taljenja i isparavanja materijala obratka. Stoga se površinski sloj sastoji od zone taljena i zone utjecaja topline (ZUT). Dolazi do promjene kristalne strukture i mehaničkih svojstava površinskog sloja, pojavljuju se zaostala naprezanja i kao posljedica toga dolazi do pojave pukotina. Prema [2] srednje aritmetičko odstupanje profila  $R_a$  obrađene površine dobivene ovim postupkom kreće se u granicama od  $0,1 \dots 0,4 \mu\text{m}$ , a točnost dimenzija izratka u granicama od  $0,002 \dots 0,02 \text{ mm}$ . Produktivnost (volumen odvojenog materijala) se najčešće kreće u granicama [28] od  $2 \dots 400 \text{ mm}^3/\text{min}$ . Postupak se primjenjuje kod obrade teškoobradivih, ali elektrovodljivih materijala (poput kaljenog čelika i tvrdog metala) i kod obrade površina kompliciranog oblika. Neki od predmeta koji se dobivaju ovim postupkom obrade su: kalupi, ukovnji, pribor za mjerenje, stezne naprave, alati, dijelovi turbina i dr.

## 6. ESKPERIMENTALNI POSTAV

Na slici 61. prikazan je eksperimentalni postav korišten kod izrade ovog diplomskog rada. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za alatne strojeve, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

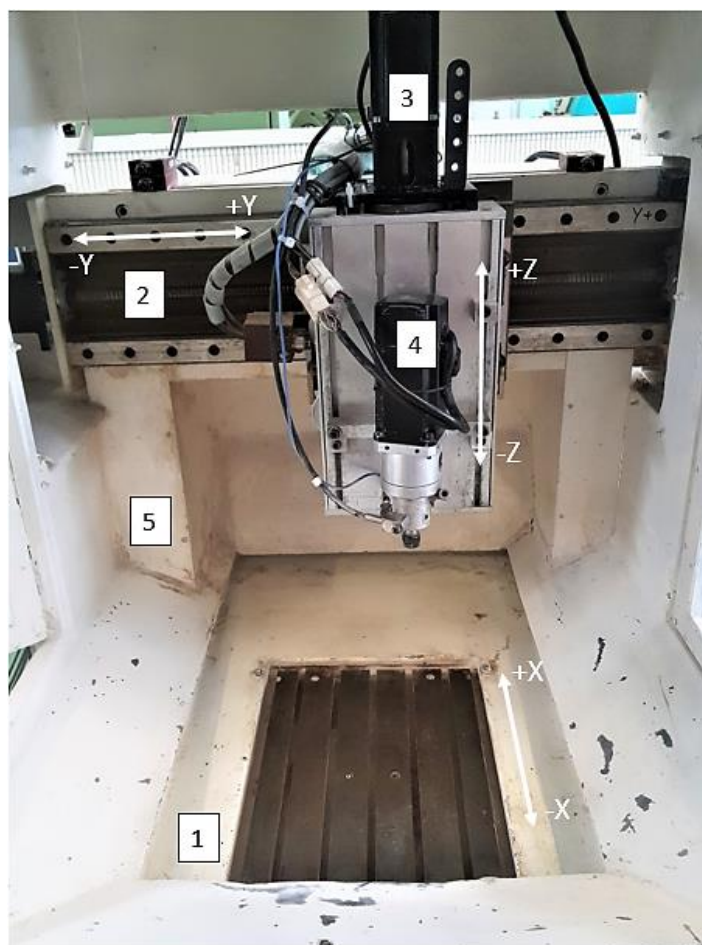


Slika 61. Eksperimentalni postav [27]

### 6.1. Konstrukcija stroja

Eksperiment je proveden na tro osnoj glodalici prikazanoj na slici 62. Radi se o portalnoj zavarenoj izvedbi postolja na koju su ugrađene kotrljajuće vodilice posmičnih prigona. Translacijsko gibanje po osi X vrši pomični radni stol, dok preostala dva translacijska gibanja po osi Y i Z vrši alat. Posmično gibanje je realizirano kugličnim navojnim vretenom. Pogon posmičnih prigona ostvaren je upotrebom sinkronih servo motora s permanentnim magnetima te su isti opremljeni s inkrementalnim enkoderima. Pogon glavnog gibanja realiziran je istim sinkronim servo motorom s permanentnim magnetima kakav je korišten i kod posmičnih prigona.





1. Posmični prigon X osi  
 2. Posmični prigon Y osi  
 3. Posmični prigon Z osi  
 4. Prigon glavnog gibanja  
 5. Postolje stroja

**Slika 62. Unutrašnjoj stroja**

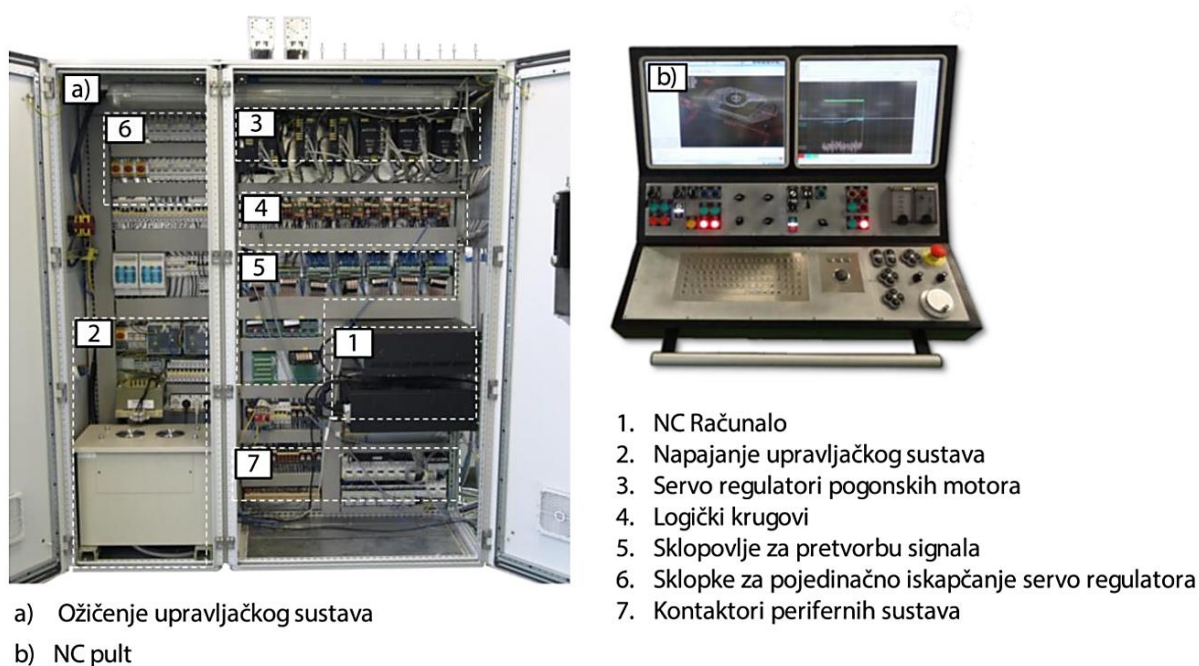
Detaljne informacije o stroju navedene su u tablici 4.

**Tablica 4. Osnovne tehničke karakteristike stroja**

		Iznos	Jedinica
Hod osi	X	350	mm
	Y	450	
	Z	55	
Korak kugličnog navojnog vretena, $p$	X,Y,Z	5	mm
Maksimalna posmična brzina, $v_{f_{max}}$	X,Y,Z	15	m/min
Nazivna učestalost vrtnje glavnog vretena, $n$		3 000	min <sup>-1</sup>
Maksimalna učestalost vrtnje glavnog vretena, $n_{max}$		5 000	min <sup>-1</sup>

## 6.2. CNC sustav

Osnovu upravljačkog dijela čini otvoreni CNC upravljački sustav EMC2 (*engl. Enhanced Machine Controller*). On je integriran na NC računalo zajedno s napajanjima, servo regulatorima i ostalim ulazno – izlaznim sklopovljem smještenim u elektro ormar (slika 63.). Upravljački sustav sadrži regulatore posmičnih i glavnih gibanja, sklopovlje za prilagodbu upravljačkih i mjernih signala te logičkih sklopova i kontaktora za kontrolu SHIP-a, podmazivanje, izmjenu alata itd. [27].

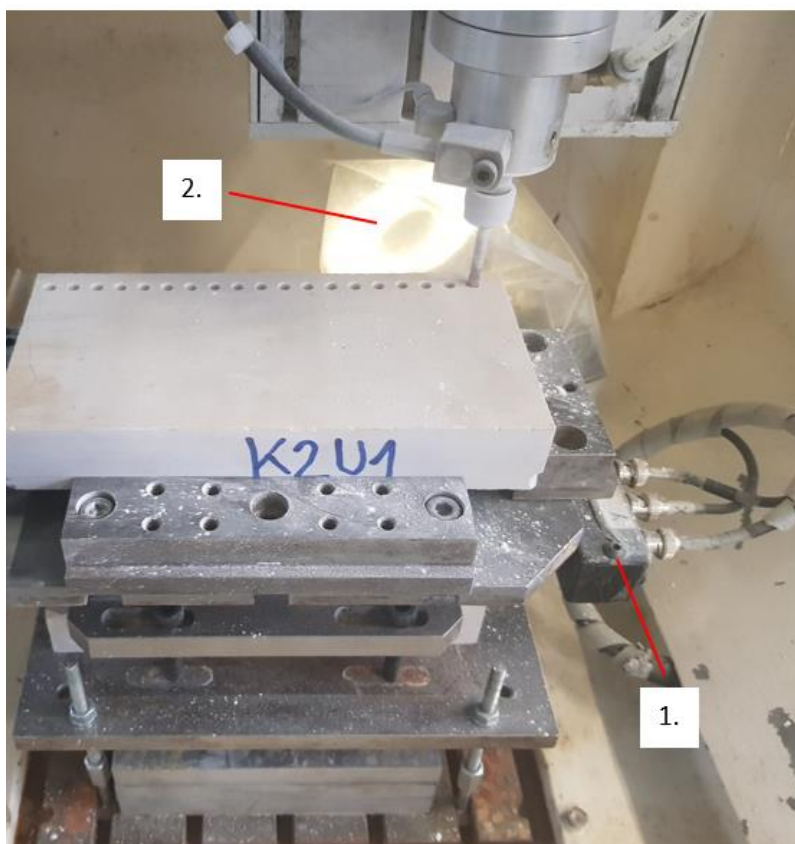


**Slika 63. Elementi upravljačkog sustava eksperimentalnog postava [27]**

## 6.3 Mjerni sustavi

Za provedbu eksperimenta na radni stol stroja smješten je senzor za mjerenje sila (slika 64., pozicija 1). Signali struja pogonskih motora prikupljeni su pomoću modula s analogno-digitalnim pretvornicima (tip IPEH-002021) proizvođača *PEAK-System Technick GmbH*. Uz postojeće NC računalo upravljačkog sustava korišteno je još jedno, vanjsko mjerno računalo s prijenosnom modularnom mjernom stanicom radi mogućnosti boljeg nadzora i kontrole eksperimenta. Isto računalo korišteno je i za izvršavanje mjerne aplikacije te kao poslužitelj za udaljeno prikazivanje grafičkog dijela *LinuxCNC* sustava. Time se izbjegla mogućnost nastanka pogreške prilikom unosa pojedinih parametara koji bitno utječu na eksperiment [27].

Također je navedeno računalo poslužilo za snimanje slika vezanih uz trošenje rezne oštrice preko vizijskog sustava (slika 64., pozicija 2).



**Slika 64. Smještaj senzora sile i industrijske kamere**

Na slici 65. prikazana je prijenosna modularna mjerna stanica (tip NI cDAQ-9178) proizvođača *National Instruments Co.* u sklopu koje su korištena dva modula [27]:

- Modul za analogne ulaze (tip NI 9201) poslužio je za akviziciju signala rezanja u smjeru X, Y, i Z osi
- Modul za digitalne ulaze (tip NI 9422) korišten za akviziciju signala okidanja



**Slika 65. Prijenosna modularna mjerna stanica**

## Mjerenje sila rezanja

Povećanjem stupnja istrošenosti alata dolazi do povećanja trenja između alata i obratka, što rezultira povećanjem potrebnog uloženog rada kod procesa obrade odvajanjem i naposljetku do povećanja sila rezanja. Stoga se koristi mjerenje sila rezanja kod indirektno metode nadzora istrošenosti oštrice reznog alata. Kod procesa obrade odvajanjem čestica moguće je mjeriti glavnu ( $F_c$ ), posmičnu ( $F_f$ ) i natražnu silu rezanja ( $F_p$ ). U literaturi [27] se preporuča prilikom postupka bušenja mjeriti aksijalne (posmične) sile.

U ovom ispitivanju, mjerenje sila rezanja izvedeno je pomoću tro-osnog senzora sila (tip 9257B, slika 66. a), tehničke karakteristike se nalaze u tablici 5.) i nabojnog pojačala (tip 5017B, slika 66. b), tehničke karakteristike se nalaze u tablici 6.) proizvođača *Kistler AG*. Troosni senzor sila smješten je na radni stol te se na njega nadovezuje stezna naprava za prihvrat ispitnih uzoraka. Signali se prikupljaju pomoću vanjskog mjernog računala i mobilne mjerne stanice.



Slika 66. Senzor sila rezanja i nabojno pojačalo

Tablica 5. Tehničke karakteristike senzora sila (tip 9257B, Kistler AG) [30]

		Iznos	Jedinica
Mjerno područje	$F_x, F_y, F_z$	$-5 \dots 5$	kN
( $F_z$ kada su $F_x$ i $F_y \leq 0,5 F_z$ )	$F_z$	$-5 \dots 10$	
Maksimalne dozvoljene sile opterećenja	$F_x, F_y, F_z$	$-7,5 \dots 7,5$	kN
( $F_z$ kada su $F_x$ i $F_y \leq 0,5 F_z$ )	$F_z$	$-7,5 \dots 15$	
Prag osjetljivosti	-	$< 0,01$	N
Osjetljivost	$F_x, F_y$	$\approx -7,5$	pC/N
	$F_z$	$\approx -3,7$	

**Tablica 6. Tehničke karakteristike nabojnog pojačala (tip 5017B, Kistler AG) [31]**

	Iznos	Jedinica
Broj kanala	3 ... 8	-
Mjerno područje	$\pm 10 \dots 999\,000$	pC
Osjetljivost	0,01 ... 9 990	pC/N
Skaliranje mjerne veličine	0,001 ... 9 990 000	N/V
Napon izlaznog signala	$\pm 10$	V
Struja izlaznog signala	$0 \dots \pm 5$	mA
Frekvencijsko područje	$\approx 0 \dots 200$	kHz

#### Mjerenje jakosti struja pogonskih motora

Kod mjerenja jakosti struja pogonskih motora (indirektna metoda nadzora) nije potrebno ugraditi dodatni senzor u sustav. Razlog tomu je taj što su servo regulatori pogonskih motora već opremljeni senzorima koji su prisutni u njihovim upravljačkim krugovima. Prema [32], do porasta amplitude jakosti struje dolazi uslijed povećanja istrošenosti oštrice reznog alata odnosno povećanjem trenja između alata i obratka. Povećanjem istrošenosti oštrice reznog alata dolazi do gotovo linearnog povećanja jakosti struja motora glavnog i posmičnih prigona. Također je ustanovljeno da stupanj istrošenosti više utječe na povećanje jakosti struja motora posmičnih prigona u odnosu na jakost struje motora glavnog prigona.

#### Vizijski sustav

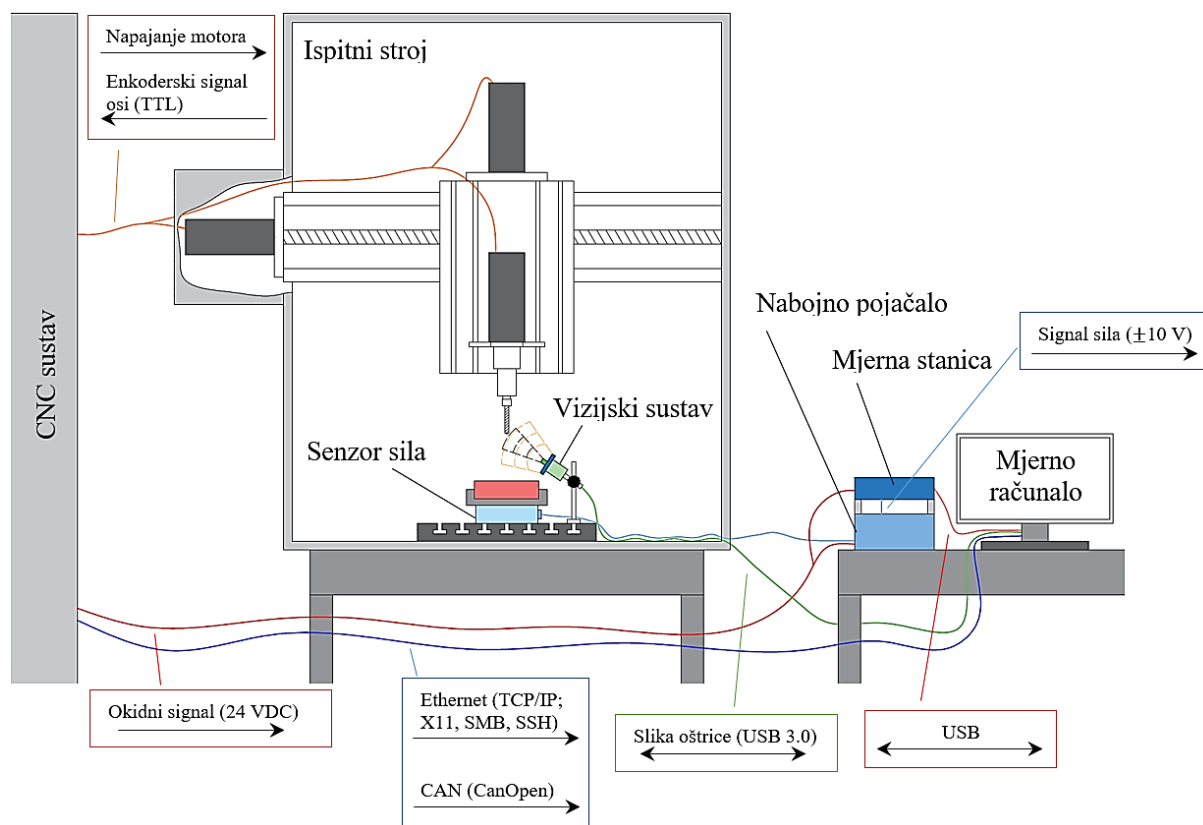
Vizijski sustav kod ovog ispitivanja realiziran je primjenom industrijske kamere (tip DMK23UX174) proizvođača Imaging Source Europe GmbH, telecentričnim objektivom (tip TC2309) proizvođača Opto Engineering S.r.l. i pripadajućim prstenom za rasvjetu. Pomoću vizijskog sustava (direktna metoda nadzora) biti će praćeni parametri trošenja periodički prema planu eksperimenta. Vizijski sustav je pričvršćen za radni stol stroja te je povezan na vanjsko mjerno računalo putem USB 3.0 veze, a detaljnije tehničke karakteristike dane su u tablici 7.



Tablica 7. Tehničke karakteristike vizijskoj sustava

		Iznos	Jedinica
Industrijska kamera (DMK23UX174) [33] 	Osjetljivost	0,05	lx
	Rezolucija	1920x1200	Piksel
	Vrsta senzora	CMOS Pregius	
	Format senzora	1/1.2	Inch
	Prihvat objektiva	C/CS	
	FPS	10 bit – 164,5 12 bit – 128,2	Sličica po sekundi
Telecentrični objektiv (TC2309) 	Povećanje	1,00	-
	Vidno polje (za format senzora 1/2")	6,4 × 4,8	mm
	Radna udaljenost	62,2	mm
	Telecentričnost (max)	< 0,08 (0,10)	°
	Ekscentričnost (max)	< 0,04 (0,08)	%
	Dubinska oštrina	0,9	mm
	Prihvat	C	

Na slici 67. shematski je prikazana kompletna struktura mjernog sustava.

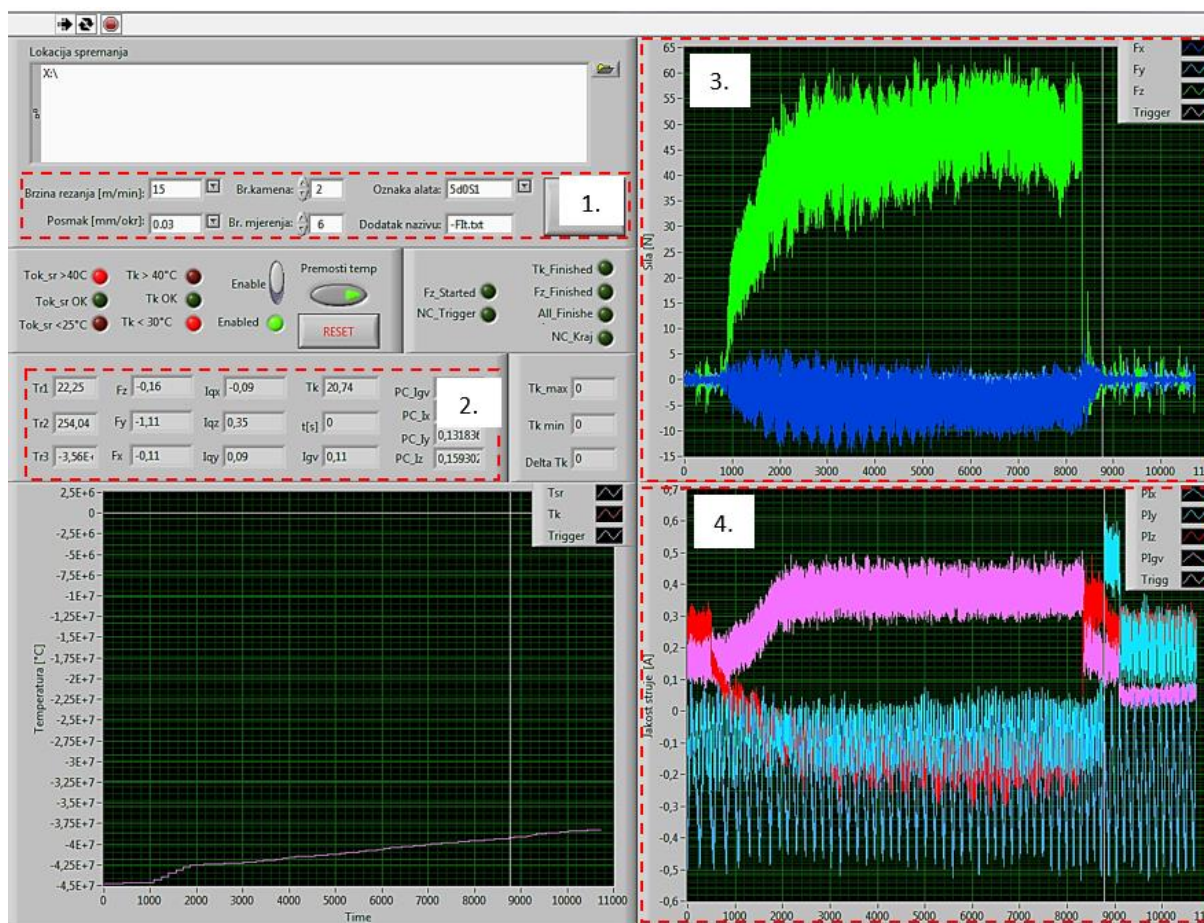


Slika 67. Shema kompletne strukture mjernog sustava

#### 6.4. Korisničko sučelje mjernog sustava

Cjelokupni nadzor eksperimenta obavljao se uz pomoć mjernog računala. Na slici 68. prikazano je *LabView* okruženje mjerne aplikacije koja je razvijena u sklopu prijašnjih ispitivanja u Laboratoriju za alatne strojeve [27]. U mjernoj aplikaciji moguće je zadavanje parametara obrade, snimanje signala nastalih u trenutku obrade, verifikacija rezultata te generiranje mjerne datoteke. Prije pokretanja snimanja signala potrebno je u navedenoj aplikaciji definirati sljedeće:

- Brzina rezanja [m/min]
- Posmak [mm/okr]
- Redni broj kamenog uzorka
- Redni broj mjerenja (ponavljanja)
- Oznaka alata i stupnja istrošenosti



1. Parametri eksperimenta

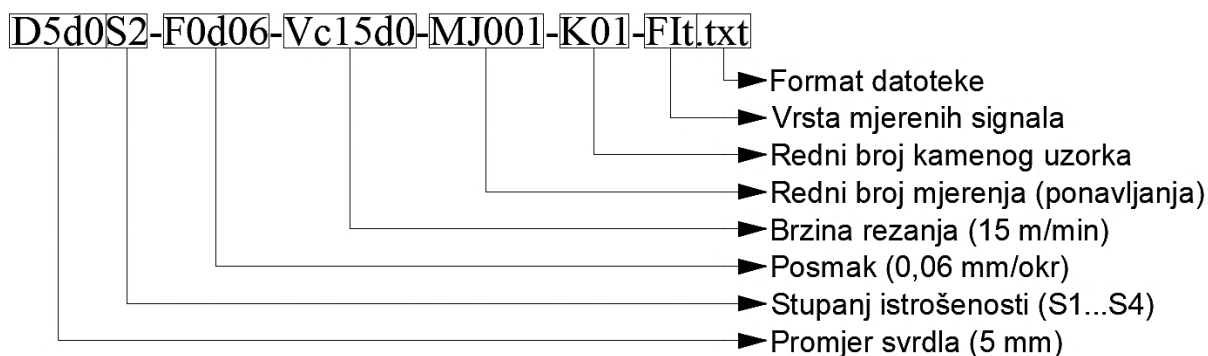
2. Trenutne vrijednosti mjerenih signala

3. Signali sila rezanja

4. Signali jakosti struja pogonskih motora

**Slika 68. Korisničko sučelje mjerene aplikacije LabView**

Tijekom procesa obrade, od trenutka signala okidanja, kontinuirano se mjeri proteklo vrijeme, sile rezanja u smjeru osi X,Y i Z te struje pogonskih motora. Signali se nakon obrade grafički prikazu u istoj aplikaciji te se spremne na željeno mjesto na računalu u .txt formatu. Primjer naziva nastale datoteke prikazan je na slici 69.

**Slika 69. Primjer naziva datoteke nakon završetka obrade**



## 7. EKSPERIMENT

U ovom poglavlju nalazi se objašnjen eksperimentalni dio diplomskog rada. Detaljno je objašnjen plan pokusa, prikazani su rezultati mjerenja te su isti analizirani.

### 7.1. Planiranje pokusa

Kod planiranja pokusa obraćena je pažnja na prethodna istraživanja bušenja kamena provedenim u Laboratoriju za alatne strojeve, kako bi se mogle usporediti kasnije dobiveni rezultati ispitivanja.

#### Ispitni uzorci

Za provedbu eksperimenta odabrane su tri vrste kamenih uzoraka koji se međusobno razlikuju u mehaničkim svojstvima, a to su:

- Sivac Konavoski, oznaka K1 (slika 70. a)
- Mironja, oznaka K2 (slika 70, b)
- Sivec, oznaka K3 (slika 70, c)



**Slika 70. Kameni uzorci**

Ispitni uzorci, dimenzija  $200 \times 90 \times 30$  mm, dobiveni su rezanjem iz većih blokova i pri tome je obraćena pažnja na smjer izuzimanja i orijentaciju uzoraka. U tablici 8. prikazane su mehanička svojstva pojedinih kamenih uzoraka koja će kasnije poslužiti kod analiziranja rezultata mjerenja.

**Tablica 8. Mehanička svojstva ispitnih uzoraka [27]**

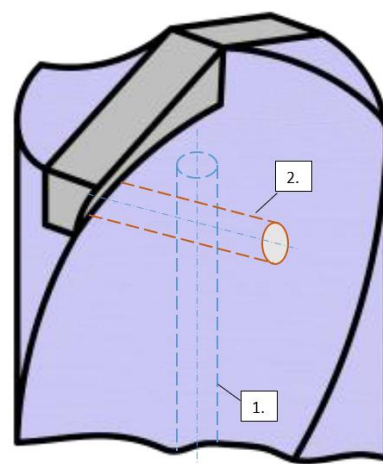
Vrsta kamena	K1	K2	K3
Komercijalni naziv kamena	Sivac Konavoski	Mironja	Sivec
Tlačna čvrstoća	$P_{pros.} = 136,8 \text{ MPa}$	$P_{pros.} = 169 \text{ MPa}$	$P_{pros.} = 162,1 \text{ MPa}$
Upijanje vode	$\vartheta = 2,08\%$	$\vartheta = 0,07\%$	$\vartheta = 0,1067\%$
Prostorna masa	$\rho = 2570 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 2690 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 2850 \text{ kg/m}^3$
Poroznost	$P = 5,2\%$	$P = 0,2\%$	$P = 0,877\%$
Tvrdoća	1815 MPa	1620 MPa	2605 MPa

Ispitno svrdlo

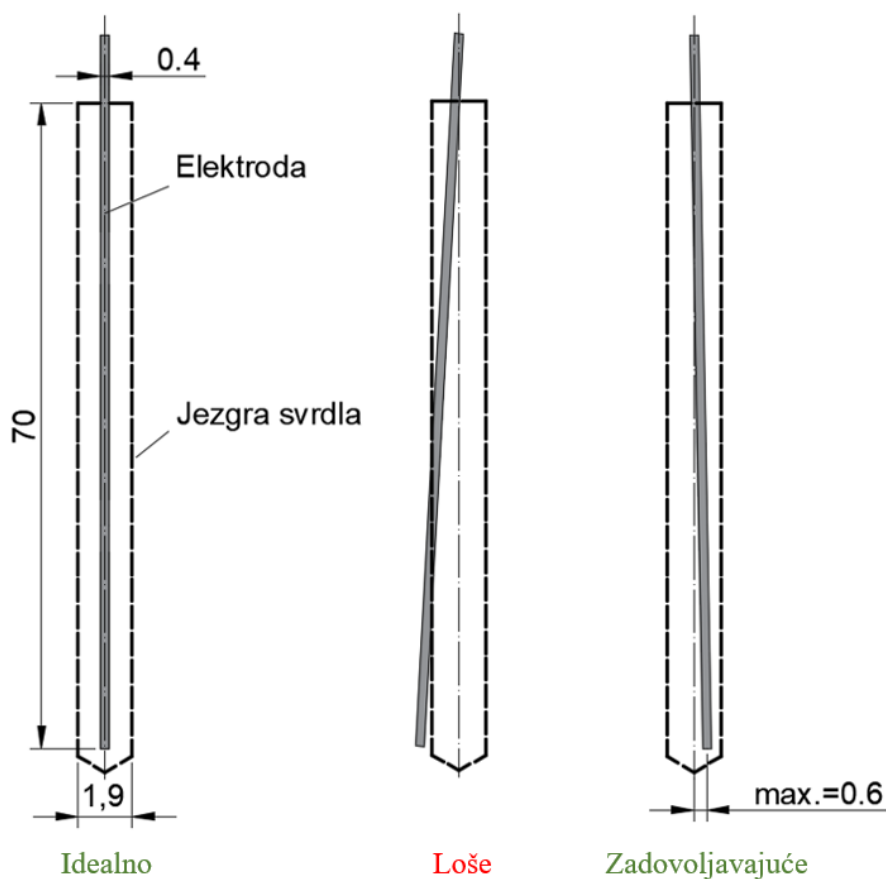
Za potrebu eksperimenta odabrano je svrdlo s tvrdo lemljenom pločicom, iz razloga jer se ono najčešće koristi kod bušenja kamena. Karakterizira ga visoka tvrdoća i čvrstoća čime se postiže zadovoljavajuća otpornost na trošenje i lom. Odabrano je svrdlo promjera 5 mm (tip M005), duljine 75 mm (maksimalna dubina obrade 45 mm) proizvođača OMGF (*Officina Martello di Giorgi F.LLI s.r.l., Italija*). Pločica od tvrdog metala izrađena je od volframovog karbida (WC) s 9% kobaltnim vezivom. Kod postupka bušenja nije potrebna prethodna operacija zabušivanja zbog oštro brušenog vrha [27]. Svrdlo je bilo potrebno modificirati na način da se izradi kanal čime bi se omogućilo ispuhivanje i hlađenje reznih oštrica svrdla tijekom procesa bušenja.

Kod izrade kanala korišten je postupak elektroerozije žigom u alatnici tvrtke Elektrokontakt d.d.. Elektroda (žig) je bila izrađena od grafita te je imala oblik šipke (duljina  $\gg$  promjera). Izrada se vršila u dva koraka (slika 71.):

- 1. korak – izrada kanala po dužini svrdla, promjera 0,4 mm na duljini od 70 mm
- 2. korak – izrada kanala po širini svrdla, promjera 0,8 mm kroz cijelu širinu svrdla

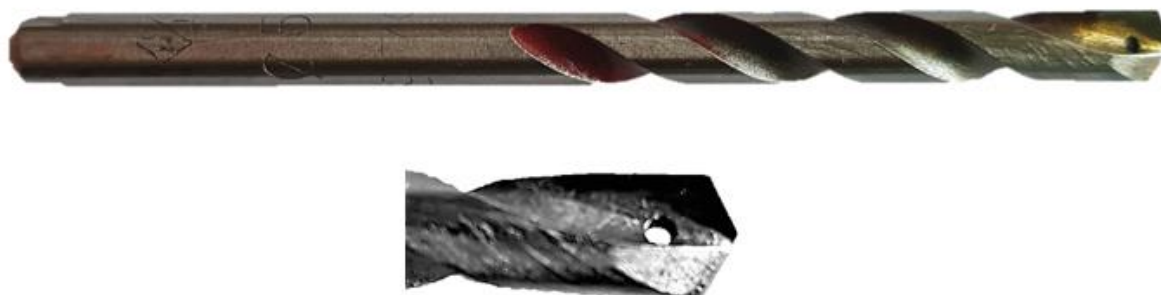
**Slika 71. Shematski prikaz vrha svrdla s kanalima za prolaz SHIP-a**

Kod izrade je najveći problem bilo ostvariti paralelnost između elektrode i svrdla. Razlog tome je taj što promjer jezgre iznosi 1,9 mm te je stoga trebalo osigurati da paralelnost bude u granicama od 0 ... 0,6 mm na dužini od 80 mm. U suprotnom bi elektroda probila vanjsku površinu svrdla što bi rezultirao bacanjem svrdla. Navedeni problem je shematski prikazano na slici 72.



**Slika 72. Problem paralelnosti svrdla i elektrode**

Vješti radnici tvrtke Elektro-kontakt d.d. uspjeli su sva svrdla dobro izraditi (5 svrdla), a primjer dobivenog svrdla prikazan je na slici 73.



**Slika 73. Ispitno svrdlo**

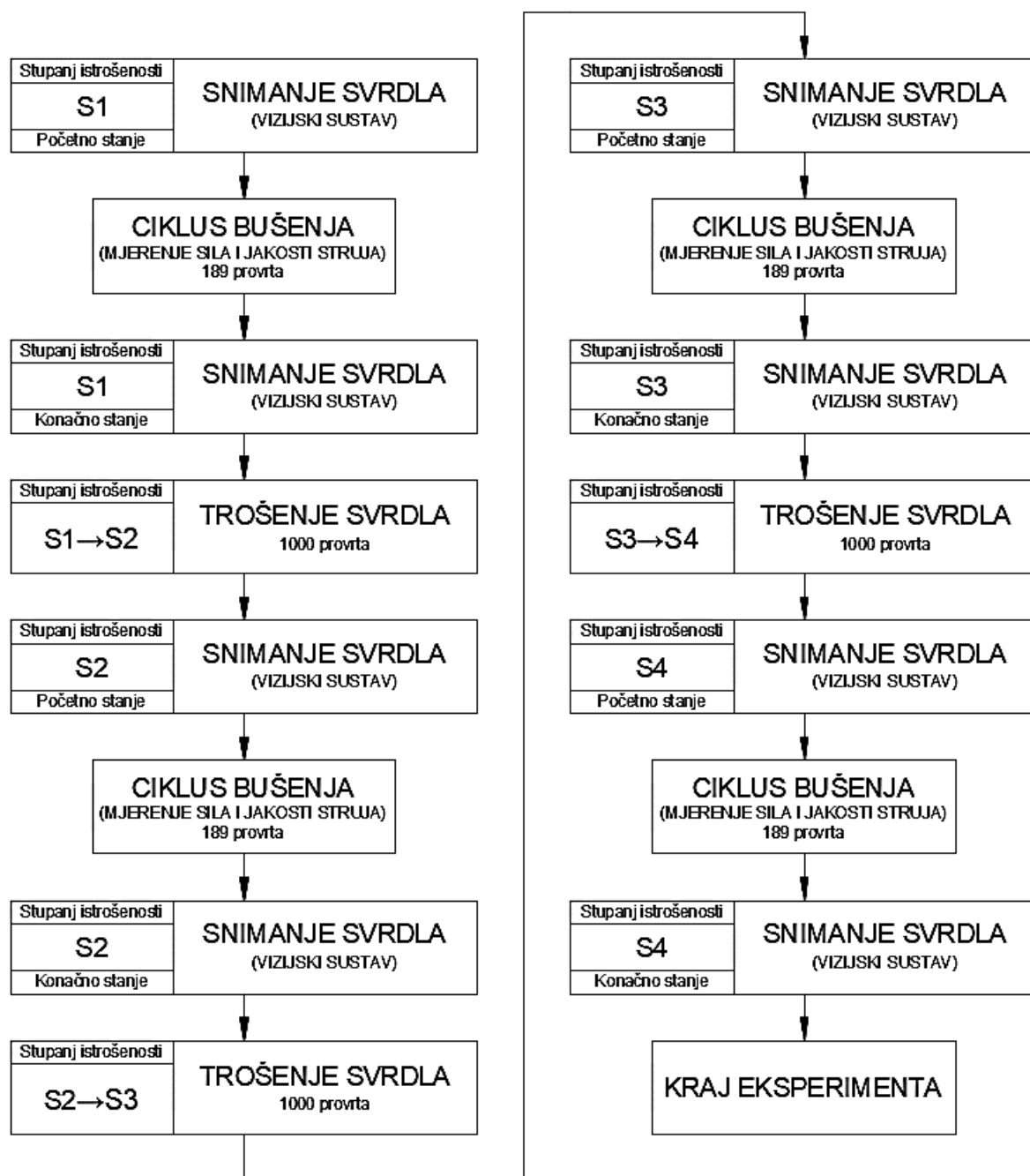
Parametri obrade i stupanj istrošenosti

Mjerenje aksijalne sile i jakosti struja motora (metoda indirektnog nadzora alata) izvršeno je je prilikom bušenja s tri različita posmaka, tri različite brzine rezanja i sedam ponavljanja. Uz tri ispitna uzorka (K1, K2, K3), dobiveno je ukupno 189 mjerenja za jedan stupanj istrošenosti. U tablici 9. prikazani su režimi obrade korišteni kod provedbe eksperimenta.

**Tablica 9. Režimi obrade**

Naziv	Oznaka / Izraz	Jedinica	Iznos								
Promjer svrdla	$d_A$	mm	5								
Brzina rezanja	$v_c$	m/min	10			15			20		
Učestalost vrtnje GV	$n = \frac{v_c}{d_a \cdot \pi}$	$\text{min}^{-1}$	636,62			954,93			1273,24		
Posmak	$f$	mm/okr.	0,03	0,06	0,09	0,03	0,06	0,09	0,03	0,06	0,09
Posmična brzina	$v_f = f \cdot n$	mm/min	19,1	38,2	57,3	28,6	57,3	85,9	38,2	76,4	114,6
Dubina bušenja	$a_p$	mm	15								
Vrijeme bušenja	$t_b = \frac{a_p \cdot 60}{v_f}$	s	47,1	23,6	15,7	31,5	15,7	10,5	23,6	11,8	7,9
Broj ponavljanja	-	-	7								

Mjerenja su izvršena uz 4 stupnja istrošenosti svrdla (S1, S2, S3, S4), gdje oznaka S1 predstavlja svrdlo na početku eksperimenta, dok oznaka S4 predstavlja istrošeno svrdlo na kraju eksperimenta. Kako bi se ostvario sljedeći stupanj istrošenja (npr. S1 → S2), svrdlo se prisilno trošilo bušenjem 1000 provrta u kamenu K1 (Sivac Konavoski) uz brzinu rezanja u iznosu od 15 m/min, posmak 0,09 mm/okr. i dubinu bušenja od 15 mm. Sveukupno se tijekom eksperimenta izbušilo 3756 provrta. Na slici 74. prikazan je dijagram toka izvođenja eksperimenta.



Slika 74. Dijagram toka izvođenja eksperimenta

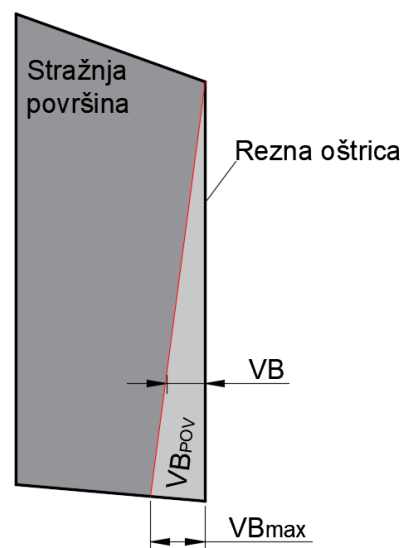
## 7.2. Mjerenje i analiza rezultata

Mjerenja istrošenosti svrdla su podijeljena na direktna i indirektna. Direktno mjerenje se sastojalo od mjerenja istrošenosti svrdla pomoću vizijskog sustava, dok se indirektno mjerenje sastojalo od mjerenja sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Kod svih mjerenja korišten je SHIP u obliku komprimiranog zraka.

### 7.2.1. Istrošenost svrdla

Istrošenost svrdla kvantificirana je sljedećim parametrima (prikazani na slici 75):

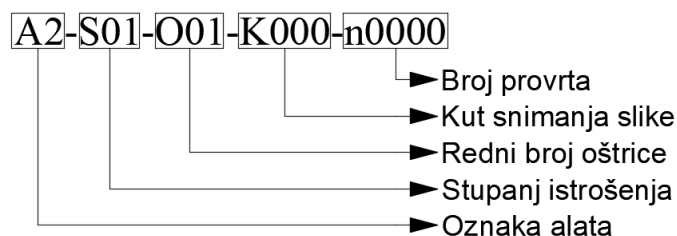
- Prosječna širina zone trošenja stražnje površine alata ( $VB$ , mm)
- Maksimalna širina zone trošenja stražnje površine alata ( $VB_{max}$ , mm)
- Površina zone trošenja stražnje površine alata ( $VB_{POV}$ , mm<sup>2</sup>)



Gore navedeni parametri trošenja dobiveni su snimanjem

(i kasnijim analiziranjem) rezne oštrice svrdla pomoću industrijske kamere kod unaprijed određenih stadija eksperimenta (navedenim na slici 74.). Kod snimanja rezne oštrice korišten je NC program u kojem je definiran položaj reznih oštrica O1 i O2 pod kutem u iznosu od 0°, 15°, 30° i 45°. Time je osigurano da se prilikom slikanja, u bilo kojem trenutku eksperimenta, svrdlo nalazi u istom položaju. Svaka slika pohranjivala se s prethodnom definiranim nazivom kao što je prikazano na slici 76.





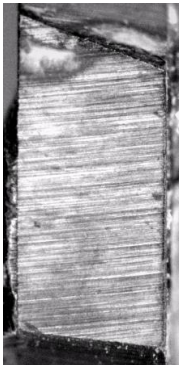
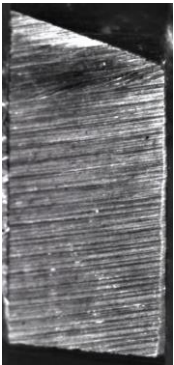


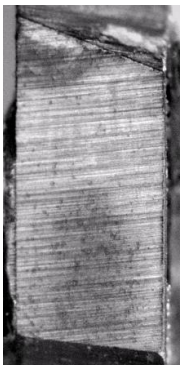


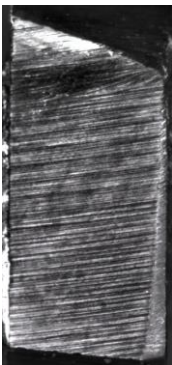
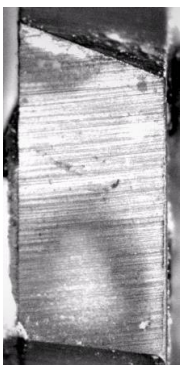
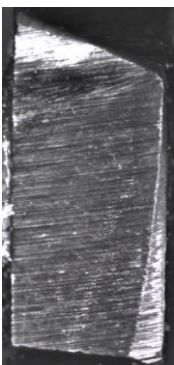


**Slika 75. Shematski prikaz stražnje površine svrdla i parametri trošenja**



**Slika 76. Primjer naziva slike kod mjerenja istrošenosti**


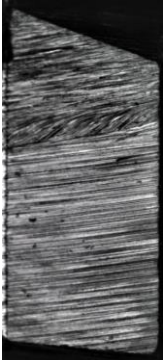


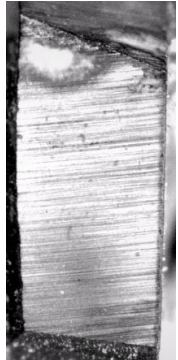






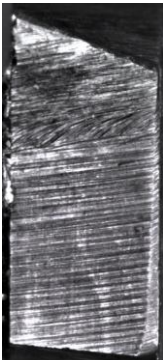

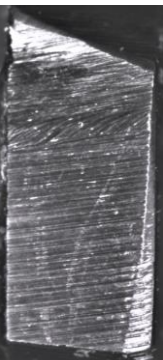

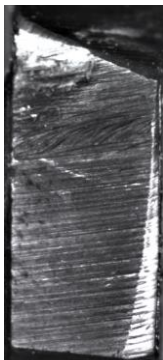
U tablicama 10. i 11. prikazane su slike početnih i konačnih stanja stražnje površine svrdla za svaki stupanj istrošenja kod obrade s i bez ispuhivanja [27].

**Tablica 10. Početno i konačno stanje stražnje površine oštrice 1 za svaki stupanj istrošenja**

Stupanj istrošenosti svrdla	Oštrica 1			
	Početno stanje		Konačno stanje	
	S ispuhivanjem	Bez ispuhivanja	S ispuhivanjem	Bez ispuhivanja
S1				
S2				
S3				
S4				

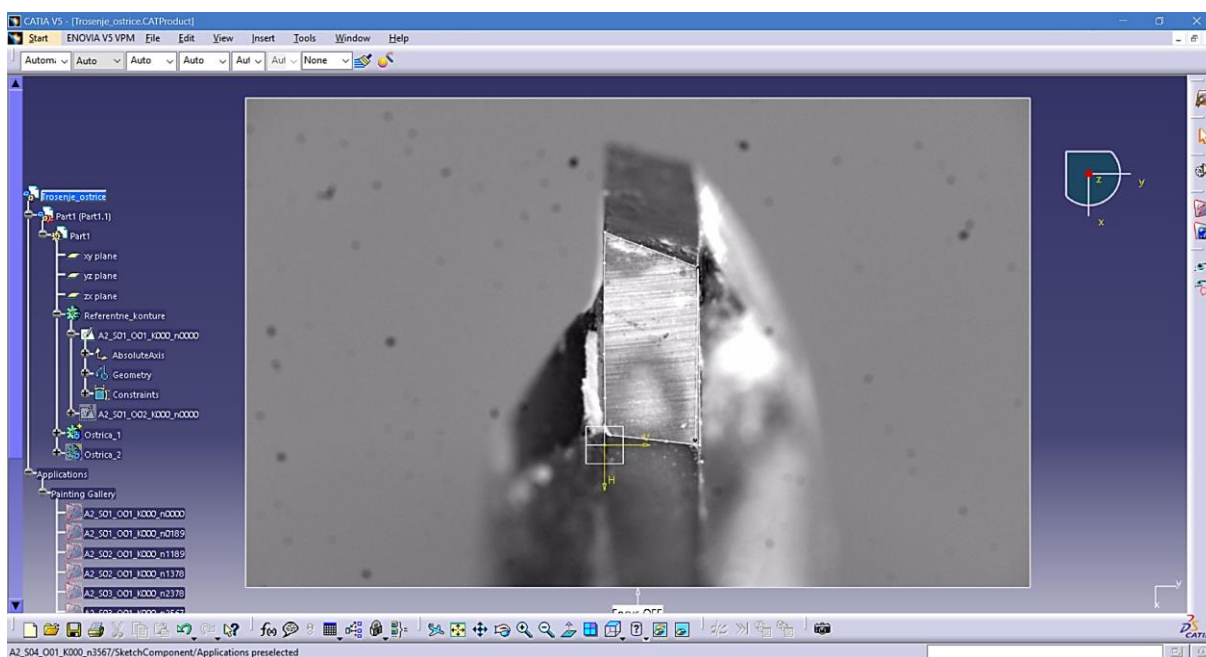


**Tablica 11. Početno i konačno stanje stražnje površine oštrice 2 za svaki stupanj istrošenja**

Stupanj istrošenosti svrdla	Oštrica 2			
	Početno stanje		Konačno stanje	
	S ispuhivanjem	Bez ispuhivanja	S ispuhivanjem	Bez ispuhivanja
S1				
S2				
S3				
S4				



Iz slika je vidljivo da kod obrade s ispuhivanjem trošenje stražnje površine svrdla je puno manje u odnosu na obradu bez ispuhivanja te da se istrošenost povećava od vrha svrdla prema rubovima duž rezne oštrice (kao i brzina rezanja). Kako bi se iz slika dobile kvantificirane vrijednosti parametara trošenja korišten je programski paket CATIA, točnije modul „Sketch tracer“ (prikazano na slici 77.). Slike početnog stanja oštrica O1 i O2 (kod stupnja istrošenja S1) korištene su kod dobivanja referentnih kontura stražnje površine. Svaka sljedeća slika bazirala se na prvotni (referentni) koordinatni sustav i na njoj je ručno nacrtana krivulja koja predstavlja granicu istrošenosti stražnje površine.



**Slika 77. Primjena programskog paketa CATIA kod određivanja parametara trošenja**

Nakon što su ucrtane sve krivulje, korišten je modul „*Product Engineering Optimizer*“. Pomoću navedenog modula međusobno su uspoređivani položaji pojedinih krivulja u odnosu na referentnu konturu stražnje površine. Dobiveni podatci automatski se spremaju u Excel datoteku. Iz tablica u Excel-u se izvlače vrijednosti koje definiraju (kvantificiraju) parametre trošenja te su oni dani u tablici 12.

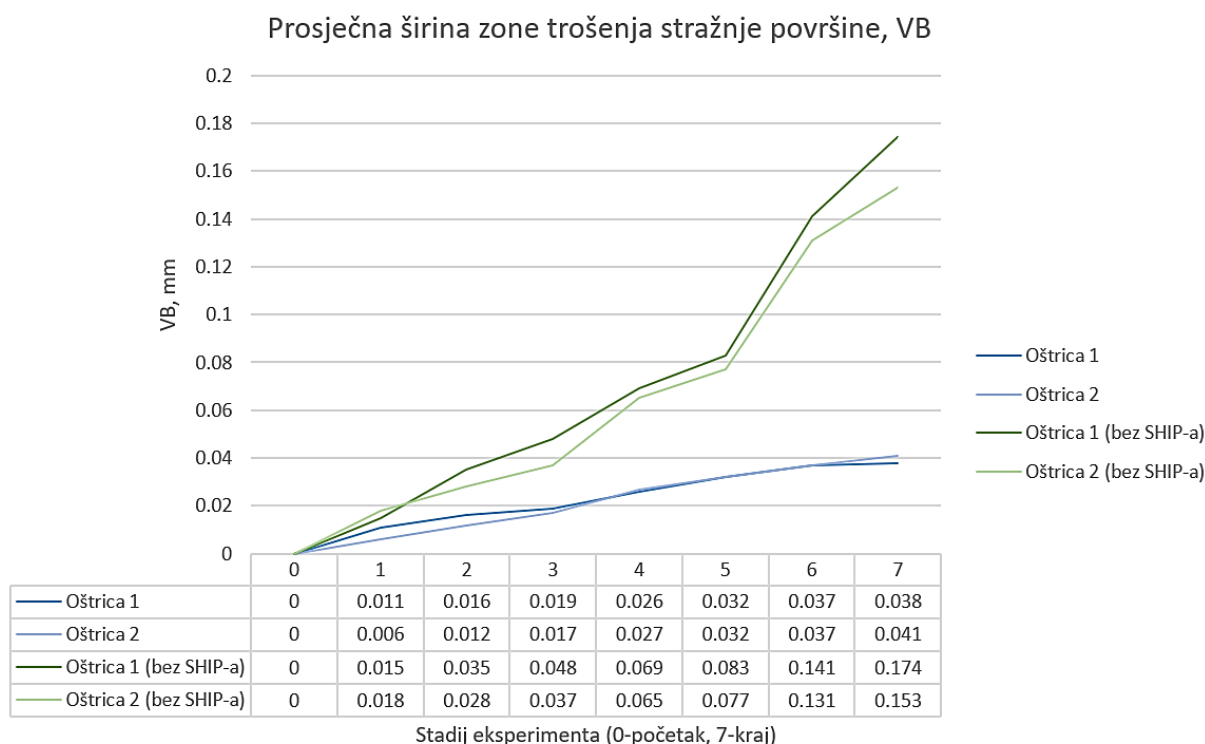
**Tablica 12. Iznos parametara trošenja s obzirom na stupanj istrošenosti**

Parametar trošenja	Oznaka	Stupanj istrošenosti	Oštrica 1		Oštrica 2		Jedinica
			Početno stanje	Konačno stanje	Početno stanje	Konačno stanje	
Prosječna širina zone trošenja stražnje površine alata	VB	S1	0	0,011	0	0,006	mm
		S2	0,016	0,019	0,012	0,017	
		S3	0,026	0,032	0,027	0,032	
		S4	0,037	0,038	0,037	0,041	
Maksimalna širina zone trošenja stražnje površine	VB <sub>max</sub>	S1	0	0,023	0	0,011	mm
		S2	0,033	0,039	0,024	0,041	
		S3	0,051	0,058	0,062	0,071	
		S4	0,066	0,074	0,079	0,084	
Površina zone trošenja stražnje površine	VB <sub>POV</sub> (VB <sub>S</sub> )	S1	0	0,024	0	0,016	mm
		S2	0,049	0,058	0,036	0,061	
		S3	0,076	0,087	0,093	0,106	
		S4	0,099	0,111	0,118	0,126	

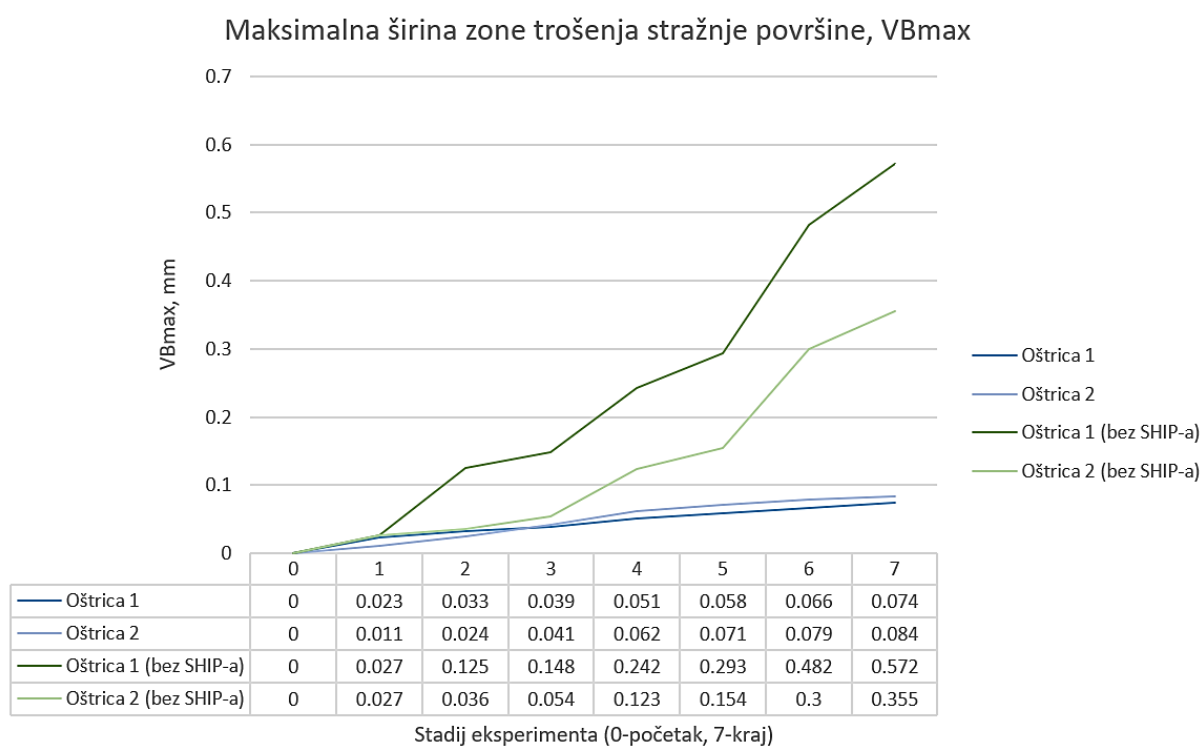
### Analiza rezultata

U tablici je vidljivo kako tijekom cijelog eksperimenta dolazi do blagog odstupanja širine zone trošenja stražnje površine između oštrice O1 i O2. Pretpostavlja se da do odstupanja dolazi zbog različitih duljina reznih oštrica, što može biti posljedica loše provedenog postupka lemljenja i naknadnog brušenja rezne pločice od tvrdog metala. Dobiveni rezultati su uspoređeni s ranijim ispitivanjima provedenim u Laboratoriju za alatne strojeve u Zagrebu [27], odnosno uspoređivati će se parametri trošenja s i bez primjene SHIP-a.

Na slici 78. i 79 prikazani su dijagrami na kojima se uspoređuju prosječne i maksimalne širine zona trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a. S plavom bojom označeni su rezultati ispitivanja s primjenom SHIP-a, a s zelenom bojom rezultati ispitivanja bez primjene SHIP-a. Vidljivo je kako se primjenom SHIP-a trošenje stražnje površine alata smanjilo s 0,4635 mm (srednja vrijednost VB<sub>max</sub> oštrica 1 i 2) na 0,079 mm, što je smanjenje u iznosu od 5.88 puta odnosno 588%.

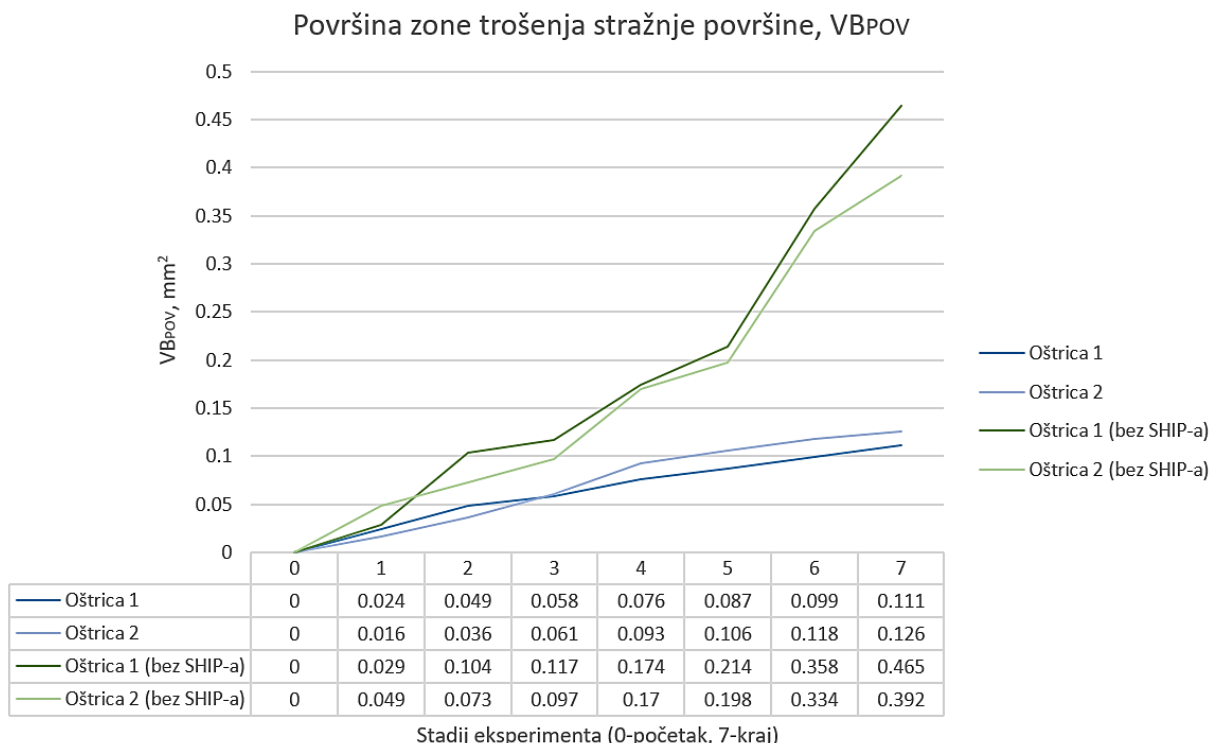


**Slika 78. Usporedba parametara trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a 1**



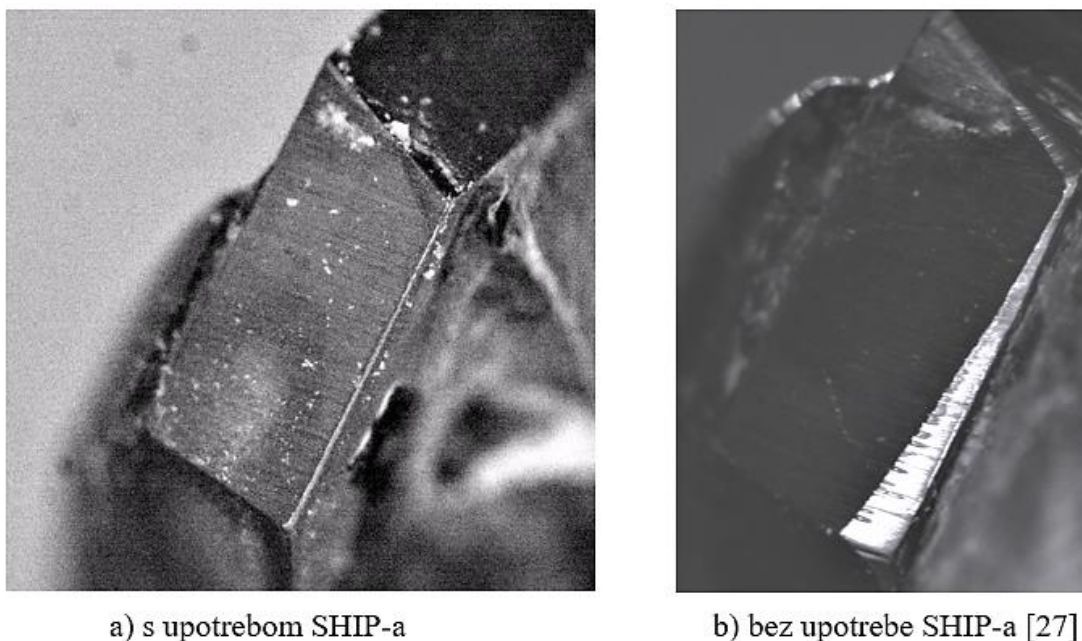
**Slika 79. Usporedba parametara trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a 2**

Na slici 80. prikazan je dijagram na kojem su uspoređene površine zona trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a. Vidljivo je kako se primjenom SHIP-a površina zone trošenja stražnje površine alata smanjila s  $0,4285 \text{ mm}^2$  (srednja vrijednost  $VB_{POV}$  oštrica 1 i 2) na  $0,1185 \text{ mm}^2$ , što je smanjenje u iznosu od 362%.



**Slika 80. Usporedba površina zone trošenja stražnje površine alata s i bez primjene SHIP-a**

Na slici 81. vidljiva je vizualna razlika u širini zone trošenja stražnje površine alata nakon izbušenih 3756 provrta kod bušenja kamena s i bez upotrebe SHIP-a.

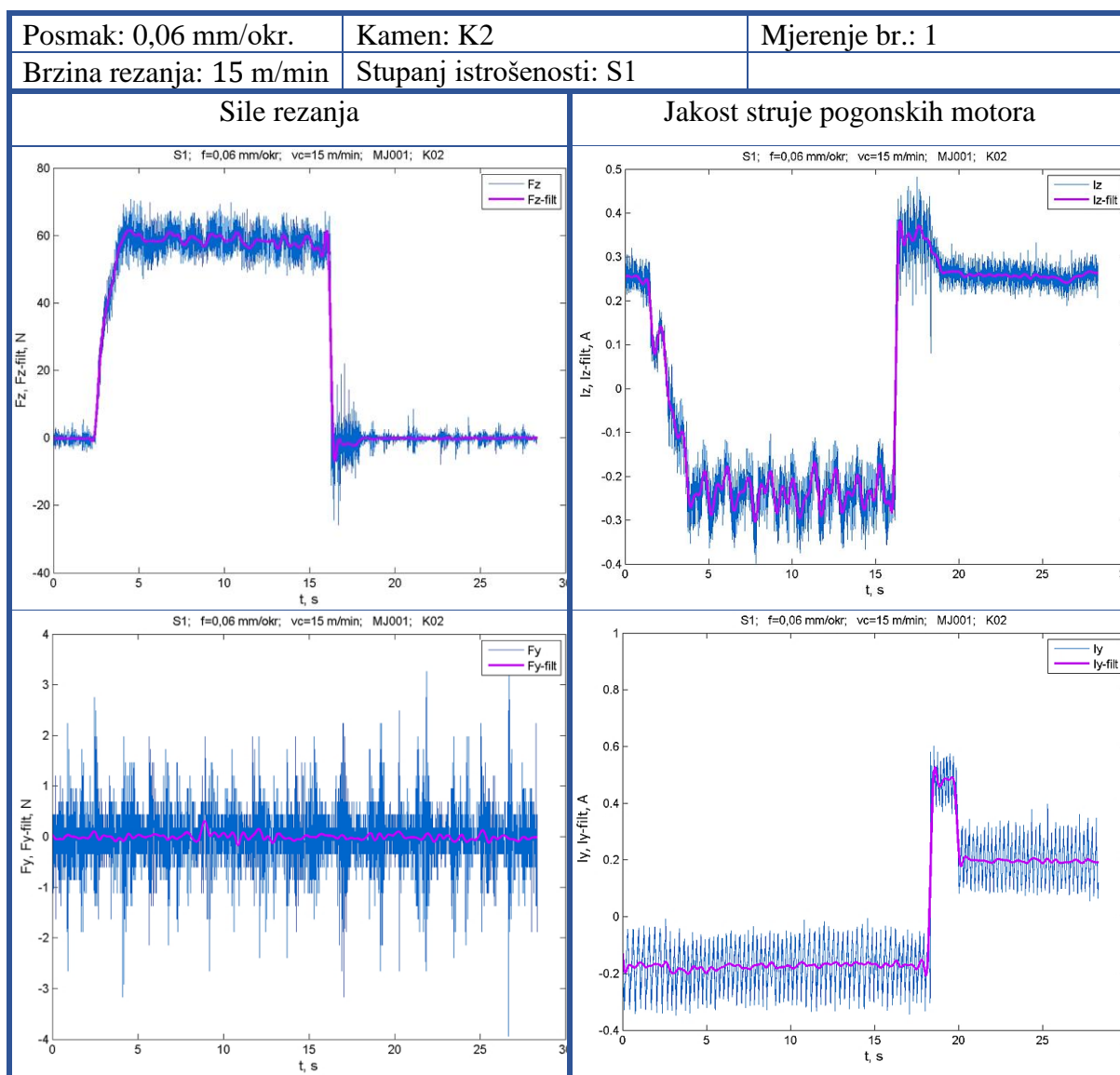


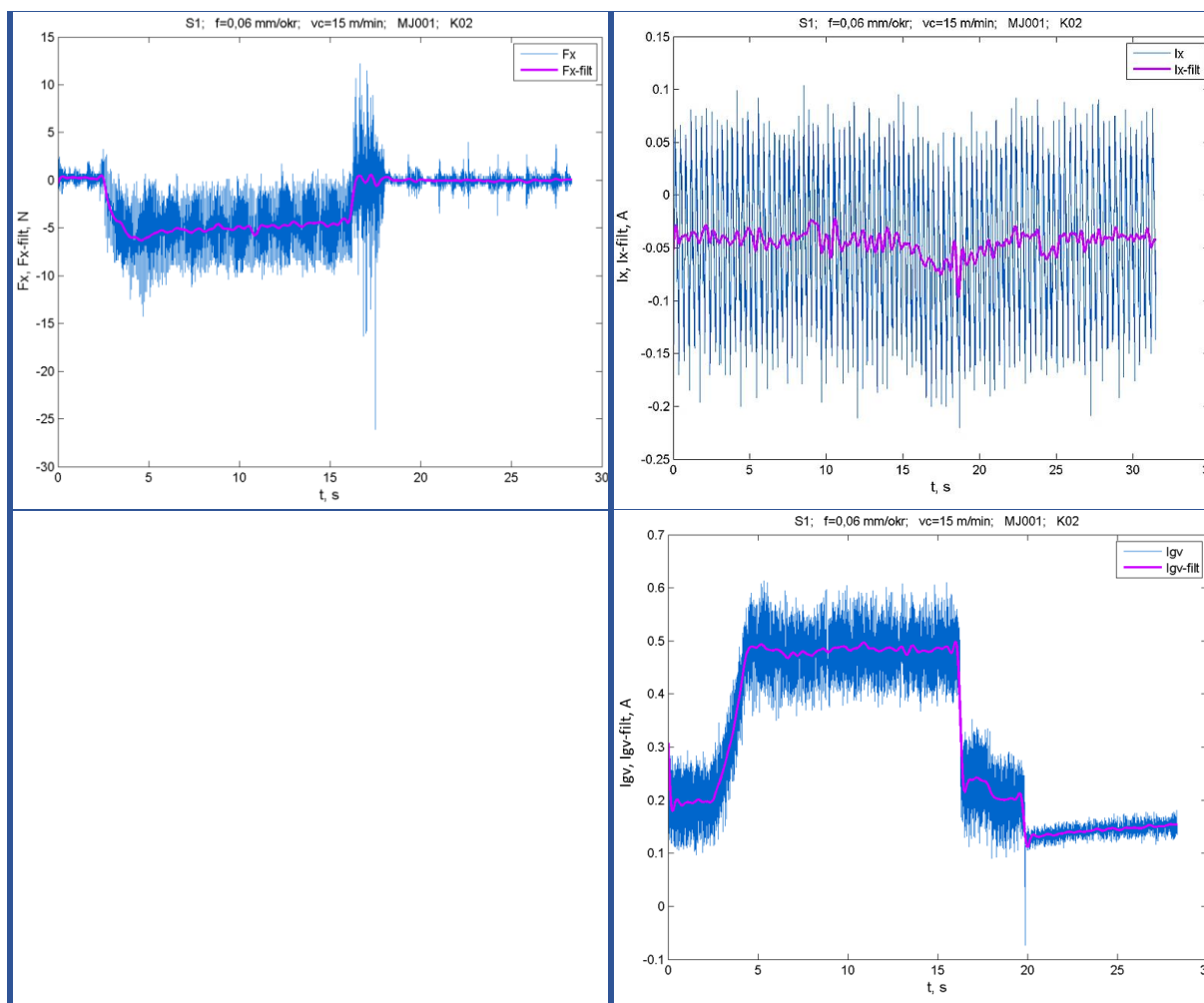
**Slika 81. Izgled stražnje površine svrdla nakon izbušenih 3756 provrta**

### 7.2.2. Sile rezanja i jakost struja pogonskih motora

Mjerenja sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora spadaju u grupu indirektnih metoda procjena istrošenosti alata, odnosno kontrola istrošenosti alata vrši se tijekom procesa obrade. Podatak o stupnju istrošenosti alata dobije se često vrlo zahtjevnom obradom signala. U tablici 13. je prikazan primjer dobivenih mjerenih signala prilikom obrade jednog provrta. Signali sila rezanja snimani su u sve tri osi  $X, Y, Z$  kao i signali jakosti struja posmičnih motora, uz dodatak mjerenja signala jakosti struja motora glavnog vretena. Nakon snimanja, navedeni signali su filtrirani Butterworthov-im niskopropusnim filtrom granične frekvencije  $f_c = 1$  Hz.

**Tablica 13. Nefiltrirani i filtrirani signali sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora**





Poučeni ranije provedenim ispitivanjima [27], za daljnju analizu dobivenih rezultata uzeti su u obzir signali aksijalne sile  $F_z$ , jakosti struje pogonskog motora osi Z ( $I_z$ ) te jakosti struje pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ), jer se kod istih može uočiti izraženija promjena vrijednost kod različitih stadija ispitivanja. Također se kod tih ispitivanja došlo do zaključka kako do povećanja aksijalne sile  $F_z$  i jakosti struja pogonskog motora osi Z ( $I_z$ ) dolazi uslijed povećanja posmaka i stupnja istrošenosti, dok povećanje brzine rezanja ima minimalan utjecaj. Jakost struje pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) se ne povećava uslijed povećanja stupnja istrošenosti.

#### Aksijalna sila $F_z$

U tablici 14. prikazane su aritmetičke sredine aksijalnih sila  $F_z$  prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a uz 7 ponavljanja.

**Tablica 14. Aritmetičke sredine aksijalnih sila  $F_z$  prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a**

Stupanj istrošenosti	$f$ mm/okr.	$v_c$ m/min	$\overline{F_z}$ s SHIP-om [N]			$\overline{F_z}$ bez SHIP-a [N], [27]		
			Ispitni uzorak			Ispitni uzorak		
			K1	K2	K3	K1	K2	K3
S1	0.03	10	16.0	49.4	29.7	155.4	98.1	113.3
S1	0.03	15	19.6	48.9	32.0	159.0	106.3	104.0
S1	0.03	20	22.9	42.9	33.6	139.3	90.4	95.7
S1	0.06	10	30.9	68.6	46.1	257.9	223.6	235.7
S1	0.06	15	36.1	62.6	48.3	278.6	182.7	235.7
S1	0.06	20	39.1	59.7	49.9	237.1	170.7	213.6
S1	0.09	10	45.4	82.6	60.4	316.4	269.3	289.3
S1	0.09	15	48.4	78.7	62.3	325.0	230.0	294.3
S1	0.09	20	52.6	78.3	63.9	303.6	231.4	283.6
S2	0.03	10	22.1	51.9	32.3	164.3	123.1	113.1
S2	0.03	15	26.1	52.1	34.3	174.3	117.7	128.1
S2	0.03	20	30.6	49.7	36.7	172.1	109.3	122.9
S2	0.06	10	43.3	73.7	48.1	292.9	217.1	220.0
S2	0.06	15	46.0	69.0	50.0	294.3	191.4	230.0
S2	0.06	20	49.4	64.6	52.7	292.9	206.4	243.6
S2	0.09	10	55.7	88.6	63.3	376.4	292.9	319.3
S2	0.09	15	62.4	84.3	66.3	369.3	256.4	335.0
S2	0.09	20	63.9	85.3	69.3	350.7	261.4	345.7
S3	0.03	10	14.1	56.1	34.7	227.9	200.7	240.0
S3	0.03	15	14.1	52.4	37.3	227.1	192.1	238.6
S3	0.03	20	16.0	51.4	38.3	247.1	210.7	187.1
S3	0.06	10	27.1	77.0	51.0	371.4	265.7	386.4
S3	0.06	15	26.1	71.1	54.3	357.9	272.9	395.0
S3	0.06	20	32.6	68.3	56.4	365.7	285.7	357.9
S3	0.09	10	37.4	95.0	66.9	452.9	346.4	483.6
S3	0.09	15	42.0	89.7	68.1	447.1	343.6	510.0
S3	0.09	20	45.3	88.6	72.9	443.6	347.9	471.4
S4	0.03	10	17.6	59.9	37.1	370.0	292.1	272.1
S4	0.03	15	20.6	60.1	39.1	405.7	291.4	257.1
S4	0.03	20	23.0	56.9	42.1	434.3	290.0	218.6
S4	0.06	10	32.9	80.3	53.4	538.6	374.3	452.1
S4	0.06	15	37.1	78.0	57.4	582.1	373.6	428.6
S4	0.06	20	41.6	74.1	59.0	593.6	370.7	340.0
S4	0.09	10	47.9	99.4	69.0	660.0	434.3	636.4
S4	0.09	15	57.0	96.7	74.9	721.4	427.9	617.9
S4	0.09	20	55.6	94.9	78.1	749.3	444.3	423.6

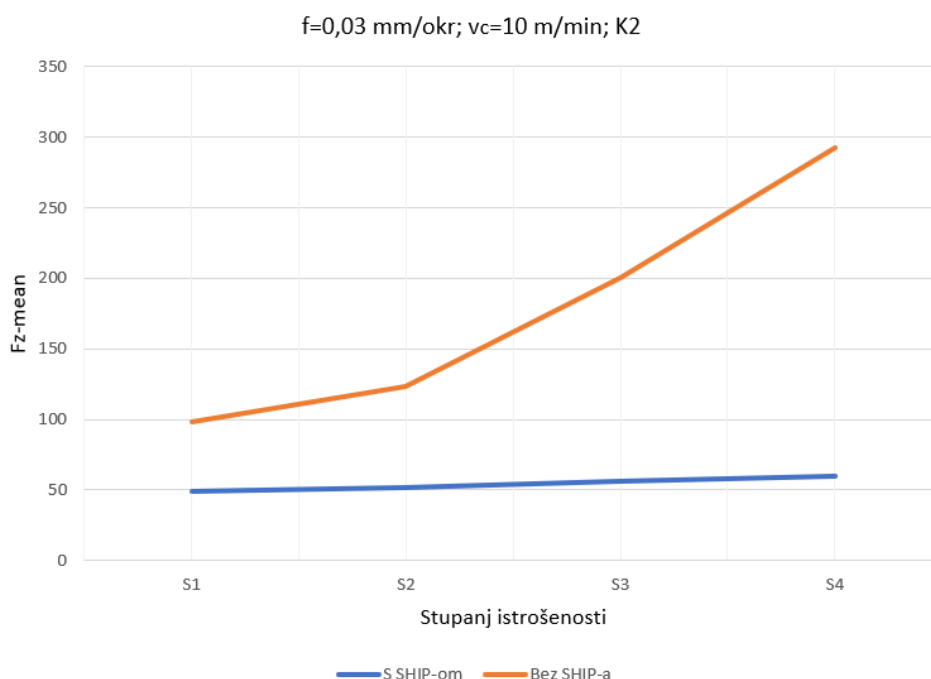


**Tablica 15. Smanjenje aksijalne sile  $F_z$  upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a**

			$\bar{F}_Z$ bez SHIP-a / $\bar{F}_Z$ s SHIP-om [%]		
			Ispitni uzorak		
Stupanj istrošenosti	$f$ [mm/okr.]	$v_c$ [m/min]	K1	K2	K3
S1	0.03	10	971	199	381
S1	0.03	15	812	218	325
S1	0.03	20	609	211	285
S1	0.06	10	836	326	511
S1	0.06	15	771	292	488
S1	0.06	20	606	286	428
S1	0.09	10	697	326	479
S1	0.09	15	671	292	472
S1	0.09	20	577	296	444
S2	0.03	10	742	237	350
S2	0.03	15	667	226	374
S2	0.03	20	563	220	335
S2	0.06	10	677	295	457
S2	0.06	15	640	277	460
S2	0.06	20	592	320	462
S2	0.09	10	676	331	505
S2	0.09	15	592	304	505
S2	0.09	20	549	307	499
S3	0.03	10	1611	358	691
S3	0.03	15	1606	366	640
S3	0.03	20	1545	410	489
S3	0.06	10	1368	345	758
S3	0.06	15	1369	384	728
S3	0.06	20	1123	418	634
S3	0.09	10	1210	365	723
S3	0.09	15	1065	383	748
S3	0.09	20	979	393	647
S4	0.03	10	2106	488	733
S4	0.03	15	1972	485	657
S4	0.03	20	1888	510	519
S4	0.06	10	1639	466	846
S4	0.06	15	1567	479	746
S4	0.06	20	1428	500	576
S4	0.09	10	1379	437	922
S4	0.09	15	1266	442	825
S4	0.09	20	1348	468	542



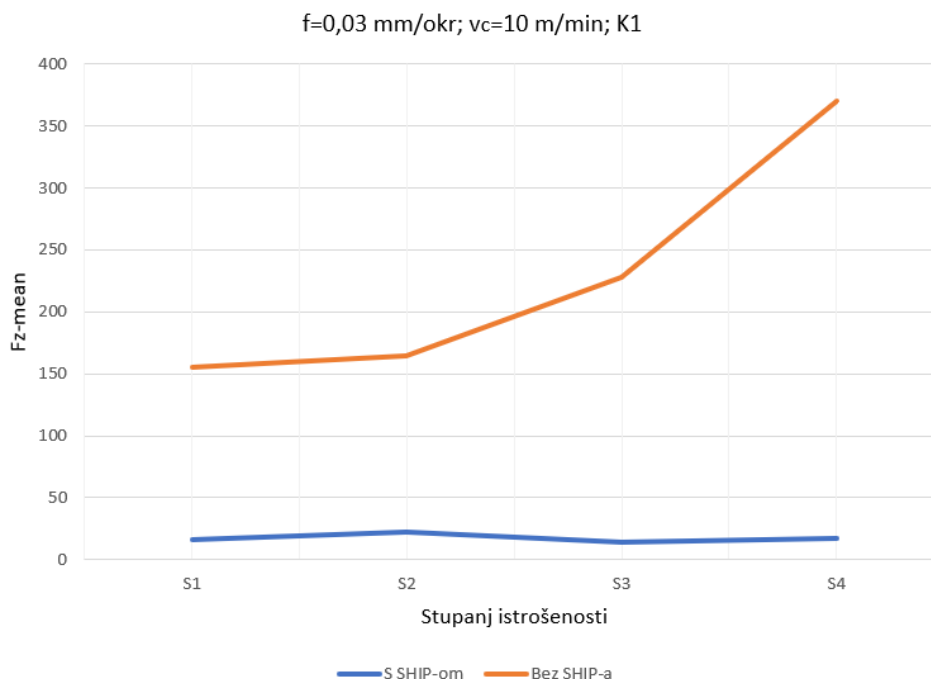
Tablica 15. prikazuje smanjenje aksijalne sile  $F_z$  (u postocima) upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP. Iz nje vidljivo kako najveće smanjenje iznosi 2106% (za S4, K1,  $f = 0,03 \text{ mm/okr.}$ ,  $v_c = 10 \text{ m/min.}$ ), dok najmanje 199% (za S1, K2,  $f = 0,03 \text{ mm/okr.}$ ,  $v_c = 10 \text{ m/min.}$ ). Ukoliko se gledaju sva mjerenja zajedno (sva tri ispitna uzorka), ukupno smanjenje aksijalne sile  $F_z$  kod cijelog eksperimenta iznosi približno 660%. Grafički su prikazana gore izdvojena mjerenja. Na slici 82. prikazano je kretanje aritmetičke sredine aksijalne sile  $\bar{F}_z$  dobivene kroz 7 ponavljanja prilikom bušenja ispitnog uzorka K2 sljedećim parametrima obrade  $f = 0,03 \frac{\text{mm}}{\text{okr.}}$  i  $v_c = 10 \text{ m/min}$ , kod svih stupnjeva istrošenosti. Vidljivo je da kod obrade s primjenom SHIP-a dolazi do blagog, gotovo linearnog povećanja aksijalne sile  $F_z$ , dok kod obrade bez primjene SHIP-a dolazi do naglog/nelinearnog povećanja aksijalne sile  $F_z$ .



**Slika 82. Usporedba aksijalnih sila  $F_z$  dobivenih prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a 1**

Na slici 83. prikazano je kretanje aritmetičke sredine aksijalne sile  $\bar{F}_z$  dobivene kroz 7 ponavljanja prilikom bušenja ispitnog uzorka K1 sljedećim parametrima obrade  $f = 0,03 \frac{\text{mm}}{\text{okr.}}$  i  $v_c = 10 \text{ m/min}$  kod svih stupnjeva istrošenosti. Na slici se je vidljivo da je prilikom obrade s primjenom SHIP-a, aksijalna sila  $F_z$  blago pala. Moguć razlog tomu je taj što su mjerenja za stupnjeve istrošenosti S1 i S2 rađena na jednom uzorku kamena K1, a za stupnjeve istrošenosti S3 i S4 na drugom uzorku kamena K1.

Također se kod obrade s primjenom SHIP-a ne može govoriti da je svrdlo postiglo određeni stupanj istrošenosti (S1 - oštra rezna oštrica, S2 – manje oštra rezna oštrica, S3 – blago tupa rezna oštrica, S4 – tupa rezna oštrica).



**Slika 83. Usporedba aksijalnih sila  $F_z$  dobivenih prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a 2**

U tablici 16. nalaze se srednje vrijednosti aksijalnih sila  $F_z$  za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti. Vidljivo je kako kod obrade s primjenom SHIP-a, najmanja vrijednost je kod obrade kamena K1, zatim K3, a najveća kod K2. Dok je kod obrade bez primjene SHIP-a raspored okrenut, najmanja vrijednost je kod obrade kamena K2, a najveća kod obrade kamena K1.

**Tablica 16. Srednja vrijednost aksijalnih sila  $F_z$  za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti**

Ispitni uzorak	$\overline{F_z}$ s SHIP-om (sva mjerenja zajedno) [N]	$\overline{F_z}$ bez SHIP-a (sva mjerenja zajedno) [N]
K1	36,1	357,1
K2	70,6	254,0
K3	51,9	301,1

#### Jakost struje pogonskog motora osi Z

U tablici 17. prikazane su aritmetičke sredine jakosti struja pogonskog motora osi Z ( $I_z$ ) prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a uz 7 ponavljanja.

**Tablica 17. Aritmetičke sredine jakosti struja pogonskog motora osi Z ( $I_Z$ )**

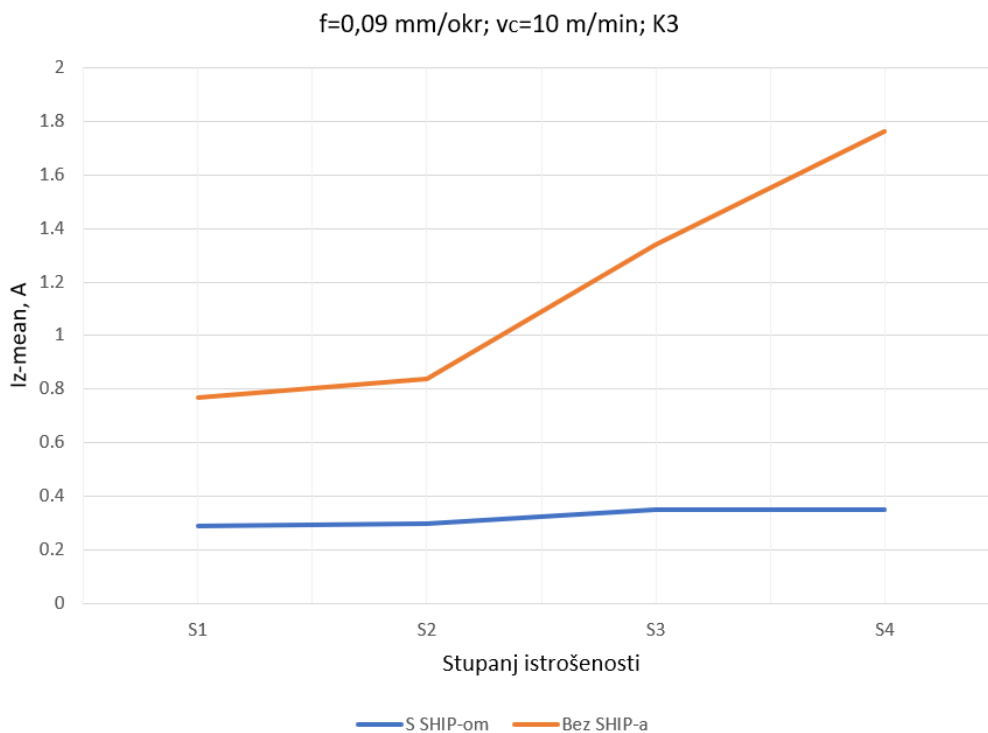
Stupanj istrošenosti	$f$ mm/okr.	$v_c$ m/min	$\bar{I}_Z$ s SHIP-om [A]			$\bar{I}_Z$ bez SHIP-a [A], [27]		
			Ispitni uzorak			Ispitni uzorak		
			K1	K2	K3	K1	K2	K3
S1	0.03	10	0.07	0.25	0.13	0.39	0.25	0.26
S1	0.03	15	0.08	0.22	0.14	0.40	0.22	0.24
S1	0.03	20	0.08	0.19	0.14	0.33	0.20	0.21
S1	0.06	10	0.13	0.34	0.21	0.68	0.57	0.60
S1	0.06	15	0.14	0.30	0.21	0.75	0.48	0.61
S1	0.06	20	0.17	0.29	0.23	0.63	0.45	0.60
S1	0.09	10	0.19	0.43	0.29	0.87	0.74	0.77
S1	0.09	15	0.23	0.40	0.31	0.88	0.64	0.81
S1	0.09	20	0.25	0.40	0.32	0.82	0.62	0.77
S2	0.03	10	0.09	0.26	0.14	0.40	0.32	0.25
S2	0.03	15	0.10	0.25	0.15	0.43	0.29	0.29
S2	0.03	20	0.12	0.23	0.16	0.44	0.26	0.28
S2	0.06	10	0.19	0.37	0.22	0.76	0.57	0.56
S2	0.06	15	0.19	0.33	0.22	0.79	0.51	0.59
S2	0.06	20	0.21	0.31	0.24	0.77	0.52	0.62
S2	0.09	10	0.26	0.45	0.30	1.03	0.77	0.84
S2	0.09	15	0.29	0.42	0.32	0.98	0.66	0.86
S2	0.09	20	0.31	0.43	0.34	0.94	0.70	0.91
S3	0.03	10	0.05	0.28	0.15	0.60	0.56	0.63
S3	0.03	15	0.05	0.25	0.16	0.60	0.50	0.61
S3	0.03	20	0.06	0.23	0.18	0.64	0.55	0.49
S3	0.06	10	0.11	0.41	0.25	0.99	0.73	1.01
S3	0.06	15	0.12	0.38	0.28	0.97	0.73	1.07
S3	0.06	20	0.14	0.33	0.27	1.01	0.78	1.01
S3	0.09	10	0.18	0.53	0.35	1.25	0.93	1.34
S3	0.09	15	0.19	0.44	0.35	1.26	0.93	1.44
S3	0.09	20	0.19	0.44	0.36	1.21	0.94	1.31
S4	0.03	10	0.06	0.29	0.16	1.07	0.85	0.78
S4	0.03	15	0.08	0.30	0.18	1.18	0.83	0.70
S4	0.03	20	0.08	0.27	0.19	1.20	0.82	0.60
S4	0.06	10	0.14	0.43	0.26	1.51	1.03	1.27
S4	0.06	15	0.17	0.40	0.28	1.59	1.00	1.14
S4	0.06	20	0.18	0.35	0.28	1.58	0.99	0.91
S4	0.09	10	0.22	0.51	0.35	1.85	1.18	1.76
S4	0.09	15	0.25	0.48	0.36	2.01	1.15	1.69
S4	0.09	20	0.25	0.46	0.37	2.08	1.18	1.13

**Tablica 18. Smanjenje jakosti struja pogonskog motora osi Z ( $I_z$ ) upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a**

			$\bar{I}_z$ bez SHIP-a / $\bar{I}_z$ s SHIP-om [%]		
			Ispitni uzorak		
Stupanj istrošenosti	$f$ [mm/okr.]	$v_c$ [m/min]	K1	K2	K3
S1	0.03	10	555	99	204
S1	0.03	15	486	99	171
S1	0.03	20	398	105	144
S1	0.06	10	531	167	282
S1	0.06	15	545	159	290
S1	0.06	20	379	157	265
S1	0.09	10	448	170	268
S1	0.09	15	376	160	263
S1	0.09	20	324	156	239
S2	0.03	10	440	125	176
S2	0.03	15	427	116	190
S2	0.03	20	370	115	179
S2	0.06	10	410	153	253
S2	0.06	15	409	153	265
S2	0.06	20	367	166	263
S2	0.09	10	404	170	278
S2	0.09	15	338	155	270
S2	0.09	20	304	162	267
S3	0.03	10	1322	203	412
S3	0.03	15	1113	201	374
S3	0.03	20	1014	236	274
S3	0.06	10	908	176	397
S3	0.06	15	824	192	386
S3	0.06	20	720	236	370
S3	0.09	10	698	177	389
S3	0.09	15	646	213	410
S3	0.09	20	630	215	360
S4	0.03	10	1747	295	483
S4	0.03	15	1507	280	380
S4	0.03	20	1450	302	321
S4	0.06	10	1111	238	497
S4	0.06	15	952	254	408
S4	0.06	20	879	286	322
S4	0.09	10	825	230	509
S4	0.09	15	810	240	474
S4	0.09	20	828	256	305

Tablica 18. prikazuje smanjenje jakosti struja pogonskog motora osi Z ( $I_Z$ ) (u postocima) upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a. Iz nje je vidljivo kako najveće smanjenje iznosi 1747% (za S4, K1,  $f = 0,03$  mm/okr.,  $v_c = 10$  m/min.), dok najmanje 99% (za S1, K2,  $f = 0,03$  mm/okr.,  $v_c = 10$  m/min). Ukoliko se gledaju sva mjerenja zajedno (sva tri ispitna uzorka), ukupno smanjenje jakosti struja pogonskog motora osi Z kod cijelog eksperimenta iznosi približno 400%. Također je vidljivo da su smanjenja malo manja nego je to bio slučaj kod aksijalnih sila  $F_Z$ . Ukoliko se izdvoje i detaljnije prouče najviše i najmanje vrijednosti i parametri kod kojih su one zabilježene, vidljivo je da vrijednosti jakosti struje pogonskog motora osi Z ( $I_Z$ ) dobro koreliraju s vrijednostima aksijalne sile  $F_Z$ , što odgovara zaključcima iz prethodnih ispitivanja [27].

Na slici 84. prikazano je kretanje aritmetičke sredine jakosti struja pogonskog motora osi Z ( $I_Z$ ) dobivene kroz 7 ponavljanja prilikom bušenja ispitnog uzorka K3 sljedećim parametrima obrade  $f = 0,09 \frac{\text{mm}}{\text{okr.}}$  i  $v_c = 10$  m/min, kod svih stupnjeva istrošenosti. Vidljivo je da kod obrade s primjenom SHIP-a dolazi do blagog, gotovo linearnog povećanja, dok kod obrade bez primjene SHIP-a na početku dolazi do blagog, a nakon toga sve izraženijeg povećanja jakosti struje pogonskog motora osi Z, što odgovara donesenom zaključku kod aksijalnih sila  $F_Z$ .



**Slika 84. Usporedba jakosti struja pogonskog motora osi Z dobivenih prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a**

U tablici 19. nalaze se srednje vrijednosti aksijalnih sila pogonskog motora osi Z ( $I_Z$ ) za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti. Vidljivo je da redoslijed, gledano od najmanje ka najvećoj vrijednosti, odgovara onom u tablici 16., što dodatno potvrđuje tvrdnju o korelaciju između jakosti struja pogonskog motora osi Z i aksijalnih sila  $F_Z$ .

**Tablica 19. Srednja vrijednost jakosti struja pogonskog motora osi Z za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti**

Ispitni uzorak	$\bar{I}_Z$ s SHIP-om (sva mjerenja zajedno) [A]	$\bar{I}_Z$ bez SHIP-a (sva mjerenja zajedno) [A]
K1	0,16	0,97
K2	0,35	0,68
K3	0,25	0,8

#### Jakost struje pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ )

U tablici 20. prikazane su aritmetičke sredine jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) prilikom obrade s i bez primjene SHIP-a uz 7 ponavljanja. Tablica 20. prikazuje smanjenje jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) (u postocima) upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a. Iz nje je vidljivo kako najveće smanjenje iznosi 381% (za S4, K1,  $f = 0,06$  mm/okr.,  $v_c = 10$  m/min.), dok najmanje 82% (za S2, K2,  $f = 0,03$  mm/okr.,  $v_c = 20$  m/min). Ukoliko se gledaju sva mjerenja zajedno (sva tri ispitna uzorka), ukupno smanjenje jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena kod cijelog eksperimenta iznosi približno 218%. Smanjenja su manja nego je to bio primjer kod aksijalnih sila  $F_Z$  i jakosti struja pogonskog motora osi Z ( $I_Z$ ).

**Tablica 20. Aritmetičke sredine jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ )**

Stupanj istrošenosti	$f$ mm/okr.	$v_c$ m/min	$\overline{I_{gv}}$ s SHIP-om [A]			$\overline{I_{gv}}$ bez SHIP-a [A], [27]		
			Ispitni uzorak			Ispitni uzorak		
			K1	K2	K3	K1	K2	K3
S1	0.03	10	0.27	0.40	0.31	0.81	0.51	0.63
S1	0.03	15	0.29	0.42	0.33	0.79	0.47	0.49
S1	0.03	20	0.31	0.42	0.36	0.60	0.44	0.41
S1	0.06	10	0.32	0.50	0.38	1.06	1.02	1.15
S1	0.06	15	0.36	0.51	0.40	1.01	0.80	1.03
S1	0.06	20	0.38	0.52	0.41	0.84	0.66	0.94
S1	0.09	10	0.38	0.58	0.42	1.10	1.13	1.16
S1	0.09	15	0.41	0.58	0.44	1.10	0.81	1.18
S1	0.09	20	0.42	0.60	0.47	1.02	0.83	1.09
S2	0.03	10	0.28	0.41	0.32	0.61	0.37	0.41
S2	0.03	15	0.30	0.43	0.34	0.60	0.37	0.45
S2	0.03	20	0.33	0.45	0.36	0.59	0.37	0.40
S2	0.06	10	0.35	0.51	0.38	0.91	0.85	0.70
S2	0.06	15	0.38	0.53	0.40	0.89	0.72	0.71
S2	0.06	20	0.40	0.55	0.42	0.86	0.65	0.77
S2	0.09	10	0.40	0.60	0.43	1.07	1.11	0.97
S2	0.09	15	0.43	0.61	0.46	1.07	0.85	1.03
S2	0.09	20	0.46	0.63	0.48	0.97	0.76	1.06
S3	0.03	10	0.24	0.42	0.32	0.65	0.59	0.77
S3	0.03	15	0.25	0.44	0.35	0.58	0.64	0.71
S3	0.03	20	0.27	0.46	0.36	0.67	0.64	0.49
S3	0.06	10	0.29	0.53	0.38	0.97	0.80	1.13
S3	0.06	15	0.30	0.54	0.40	0.88	0.85	1.11
S3	0.06	20	0.34	0.55	0.42	0.86	0.79	1.00
S3	0.09	10	0.34	0.61	0.43	1.14	1.16	1.29
S3	0.09	15	0.37	0.62	0.45	1.08	0.98	1.37
S3	0.09	20	0.39	0.64	0.48	1.05	0.90	1.18
S4	0.03	10	0.23	0.42	0.30	0.73	0.88	0.80
S4	0.03	15	0.25	0.44	0.32	0.77	0.84	0.68
S4	0.03	20	0.26	0.44	0.33	0.80	0.79	0.51
S4	0.06	10	0.29	0.52	0.36	1.07	1.07	1.14
S4	0.06	15	0.32	0.54	0.39	1.06	0.98	1.05
S4	0.06	20	0.34	0.53	0.40	1.03	0.94	0.72
S4	0.09	10	0.35	0.60	0.42	1.21	1.22	1.61
S4	0.09	15	0.39	0.62	0.44	1.29	1.09	1.45
S4	0.09	20	0.39	0.62	0.46	1.23	1.07	0.76

**Tablica 21. Smanjenje jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) upotrebom komprimiranog zraka u svojstvu SHIP-a**

			$\bar{I}_Z$ bez SHIP-a / $\bar{I}_Z$ s SHIP-om [%]		
			Ispitni uzorak		
Stupanj istrošenosti	$f$ [mm/okr.]	$v_c$ [m/min]	K1	K2	K3
S1	0.03	10	301	127	201
S1	0.03	15	273	112	149
S1	0.03	20	193	105	115
S1	0.06	10	333	205	304
S1	0.06	15	284	158	261
S1	0.06	20	222	126	227
S1	0.09	10	290	196	278
S1	0.09	15	269	139	268
S1	0.09	20	241	139	233
S2	0.03	10	221	91	131
S2	0.03	15	197	86	134
S2	0.03	20	178	82	110
S2	0.06	10	261	167	184
S2	0.06	15	235	136	177
S2	0.06	20	217	119	183
S2	0.09	10	264	187	225
S2	0.09	15	247	140	226
S2	0.09	20	212	119	223
S3	0.03	10	274	141	243
S3	0.03	15	231	146	205
S3	0.03	20	246	139	133
S3	0.06	10	338	153	297
S3	0.06	15	296	158	273
S3	0.06	20	253	144	238
S3	0.09	10	337	191	301
S3	0.09	15	294	159	302
S3	0.09	20	270	141	248
S4	0.03	10	316	212	265
S4	0.03	15	311	191	210
S4	0.03	20	303	180	153
S4	0.06	10	370	206	315
S4	0.06	15	332	183	268
S4	0.06	20	305	177	180
S4	0.09	10	348	204	381
S4	0.09	15	332	176	327
S4	0.09	20	313	174	164

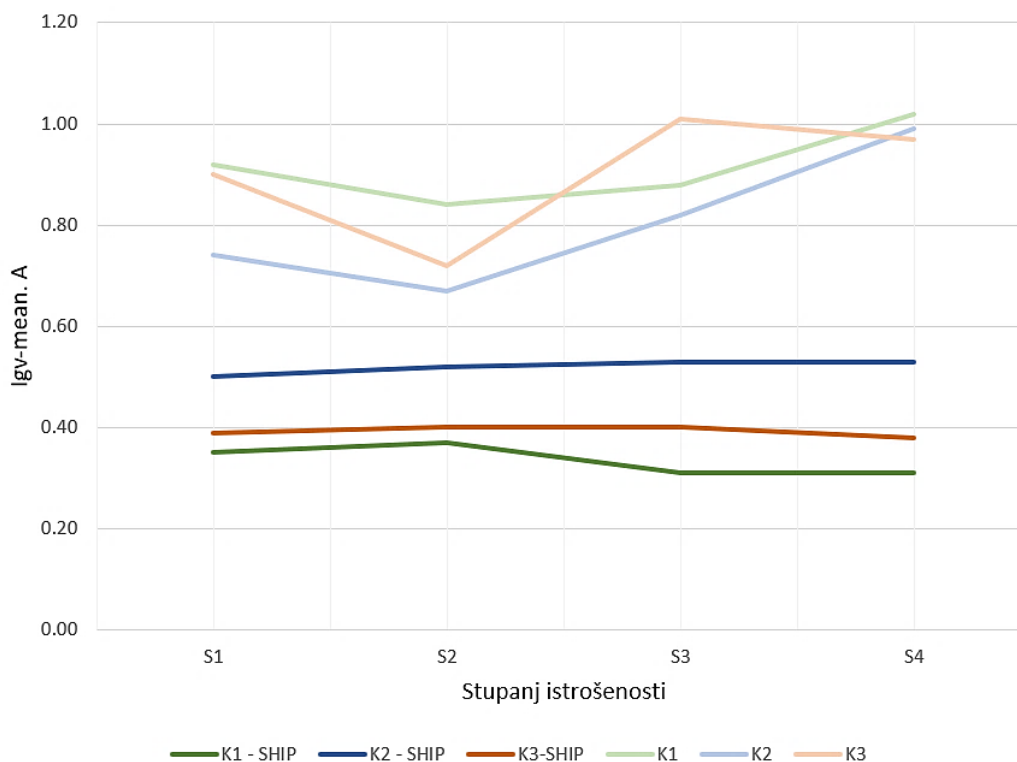


U tablici 22. nalaze se srednje vrijednosti aksijalnih sila pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti. Vidljivo je da redoslijed, gledano od najmanje k najvećoj vrijednosti, odgovara onima u tablicama 16. i 19., ali uz prividno manje međusobne razlike kod rezultata dobivenih obradom bez primjene SHIP-a.

**Tablica 22. Srednja vrijednost jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena za svaki od ispitnih uzoraka neovisno o parametrima obrade i stupnju istrošenosti**

Ispitni uzorak	$\bar{F}_Z$ s SHIP-om (sva mjerenja zajedno) [A]	$\bar{F}_Z$ bez SHIP-a (sva mjerenja zajedno) [A]
K1	0,34	0,92
K2	0,52	0,80
K3	0,39	0,90

Na slici 85. prikazana je srednja vrijednost jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena za svaki od ispitnih uzoraka ovisno o stupnju istrošenosti, a neovisno o parametrima obrade. Vidljivo je kako se vrijednosti ne povećavaju konstantno s povećanjem stupnja istrošenosti, čime se može zaključiti da se jakost struja pogonskog motora glavnog vretena ne bi trebala uzimati u obzir prilikom indirektnog određivanja stupnja istrošenosti, što odgovara zaključcima donesenim kod prethodnih ispitivanja [27].



**Slika 85. Srednje vrijednosti jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena**

Pretpostavlja se da je do smanjenja između vrijednosti jakosti struja pogonskog motora glavnog vretena, kada se vršila obrada s primjenom SHIP-a i bez nje, došlo samo zbog smanjenja trenja uzrokovanog odvojenom česticom koja se zadržavala u provrtu kod obrade bez primjene SHIP-a.

## 8. ZAKLJUČAK

Posljednjih godina sve se veći napor ulaže u istraživanje obrade nehomogenih materijala čija svojstva nisu jednaka po cijelom volumenu promatranog tijela. Navedeni problem utječe na njihovu obradivost, a jedan od takvih materijala je i kamen. Odvojena čestica kod bušenja kamena ima oblik praha, a upravo taj oblik odvojene čestice uzrokuje opasnost od njezina nakupljanja u provrtu prilikom obrade. Pritom dolazi do povećanja sile rezanja, zagrijavanja svrdla i na posljeticu do njegovog intenzivnog trošenja.

Stoga je u ovom radu proveden eksperiment u kojem se ispitivao utjecaj odvođenja odvojene čestice na stupanj istrošenosti svrdla, porast aksijalne sile i jakosti struja pogonskih elektromotora. Ispitivanjem tržišta, nije pronađeno svrdlo za obradu kamena koje ima izrađene kanale za dovod sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Stoga, su se navedeni kanali izradili na dostupnom komercijalnom svrdlu za obradu kamena s tvrdo lemljenim pločicama pomoću postupka elektroerozijske obrade žigom. Dobivenim svrdlom proveden je eksperiment tijekom kojeg su izbušena 3756 provrta. Mjerenja istrošenosti svrdla su bila podijeljena na direktna i indirektna. Direktna mjerenja su se sastojala od mjerenja istrošenosti svrdla pomoću vizijskog sustava, dok su se indirektna mjerenja sastojala od mjerenja sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora (kod svih mjerenja korišten je SHIP u obliku komprimiranog zraka). Nakon analize i usporedbe dobivenih rezultata mjerenja s prethodnim ispitivanjima, došlo se do sljedećih zaključaka:

- Istrošenost svrdla, kvantificirana preko širine i površine zone trošenja stražnje površine, se značajno smanjila. Maksimalna širina zone trošenja stražnje površine ( $VB_{\max}$ ) se smanjila za 588%, dok se površina zone trošenja stražnje površine ( $VB_{\text{POV}}$ ) smanjila za 362%.
- Aksijalne sile  $F_z$  su se prosječno smanjile za 660%
- Jakost struje pogonskog motora osi Z ( $I_z$ ) se prosječno smanjila za 400%, a jakost struje pogonskog motora glavnog vretena ( $I_{gv}$ ) za 218%

Korištenjem komprimiranog zraka iskorištena je jedna od glavnih korisnosti primjene SHIP-a, a to je odvođenje odvojene čestice iz provrta. Međutim korištenjem neke druge vrste SHIP-a, poput vode i emulzije, svrdlo bi se dodatno hladilo te teoretski postoji vjerojatnost još većeg smanjenja istrošenosti vrha svrdla. Stoga bi se nastavak istraživanja u ovom području mogao provest u tom pravcu.

---

**LITERATURA**

- [1] Charles Singer, E.J. Holmyard, A.R. Hall: A History of Technology, Volume 1, England, 1967.
- [2] Toma Udiljak: Obrada odvajanjem – Predavanja, FSB, Zagreb, ak. god. 2014./2015.
- [3] Hans Kurt Toenshoff, Berend Denkena: Basics of Cutting and Abrasive Processes, Springer, UK, 2013.
- [4] <https://www.cromwell.co.uk/>, pristupljeno dana: 11.1.2018.
- [5] Lado Pletikosi: Primjena kamena u graditeljstvu – Diplomski rad, Građevinski fakultet, Zagreb, 2007.
- [6] <http://www.coulonstone.com>, pristupljeno dana: 12.1.2018.
- [7] Hannes Grobe: Oprema za ispitivanje tvrdoće po Mohs-u, 2013.
- [8] Graham T. Smith: Cutting Tool Technology – Industrial Handbook, Springer, UK, 2008.
- [9] Sandvik: Rotating tools, 2017.
- [10] F.A. Almeida, A.J.S. Fernandes, R.F. Silva, F.J. Oliveira: Re-sharpenable thick CVD diamond-coated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tools for hardmetal, Surface and Coatings Technology 201, 2006.
- [11] Krešimir Grilec, Suzana Jakovljević: Tribologija – Autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2015.
- [12] Giovanni Straffelini: Friction and Wear – Methodologies for Design and Control, Springer, Italy, 2015.
- [13] <http://www.machiningefficiencies.com/toolwearphotos>, pristupljeno dana: 5.2.2018.
- [14] Jorge A. Olortegui-Yume, Patrick Y. Know: Tool wear mechanisms in machining, MIT, USA, 2007.
- [15] Jan Tomiček: Theory of cutting – Tool wear, Faculty of Mechanical Engineering, Czech republic, 2015.
- [16] <http://www.mecholic.com/2016/02/tool-wear-mechanism-abrasion-fatigue>, pristupljeno dana: 6.2.2018.
- [17] SANDVIK Coromant: Training Handbook – Metal cutting technology, 2017.
- [18] S. Dolinsek, B. Sustarsic, J. Kopac: Wear Mechanism of Cutting Tools in High Speed Cutting Process, Wear, 2001.
- [19] Toma Udiljak: Postupci obrade odvajanjem – Predavanja, FSB, Zagreb, ak. god. 2016./2017.
- [20] J. Paulo Davim: Machining – Fundamentals and Recent Advances, Springer, Portugal, 2008.

- [21] Miles Free: Foaming – why base oil differences matter in you shop, Precision Machined Products Association (PMPA), 2017.
- [22] Preuzeto s <https://hr.wikipedia.org/wiki/Emulzija#/media/File:Emulsions.svg>, na dan 15.02.2018.
- [23] Viktor P. Astakhov: Ecological Machining – Near-dry Machining, Machining Fundamentals and Recent Advances, Springer, London, 2008.
- [24] Lin Zhu, Tien-Chien Jen, Yong-Bing Liu, Jie-Wen Zhao, Wei-Lai Liu, Yi-Hsin Yen: Cutting Tool Life Analysis in Heat-Pipe Assisted Drilling operations, Journal of Manufacturing Science & Engineering, ASME, USA, 2015.
- [25] Marisa Pamplona, Mathias Kocher, Rolf Snethlage & Luid Aires Barros: Drilling resistance – overview and outlook, Stuttgart, Germany, 2007.
- [26] Joao Manuel Mimoso, Doria Rodrigues Costa: A new DRMS drilling technique for the laboratory, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisabon, Portugal
- [27] Miho Klaić: Doktorski rad – Indirektni nadzor istrošenosti alata i tvrdoće obratka kod bušenja kamena, FSB, Zagreb, 2018.
- [28] B.J. Ranganath: Theram Metal Cutting Processes – Chapter 2 – Electric Discharge Machining (EDM), I.K. International, 2008.
- [29] A.R. Khan, M.M. Rahman, K. Kadirgama: An experimental investigation on surface finish in die-sinking EDM of Ti-5Al-2,5Sn, Springer, London, 2014
- [30] <https://www.kistler.com/?type=669&fid=75324&model=document>, pristupljeno dana: 23.05.2018.
- [31] [http://www.process-controls.com/intertechnology/Kistler/pdfs/ACC\\_5017B\\_Charge\\_Amplifier.pdf](http://www.process-controls.com/intertechnology/Kistler/pdfs/ACC_5017B_Charge_Amplifier.pdf), pristupljeno dana: 23.05.2018.
- [32] Xiaoli Li, S.K. Tso: Drill wear monitoring based on current signals, Wear 231 (1999) 172-178
- [33] <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-3.0-monochrome/dmk23ux174/>, pristupljeno dana: 23.05.2018.
- [34] <https://www.opto-engineering.com/products/matrix-detector-telecentric-lens-model-TC23009>, pristupljeno dana: 23.05.2018.
- [35] Miho Klaić, Tomislav Staroveški, Toma Udiljak: Tool wear classification using decision trees in stone drilling applications: a preliminary study, FSB, Zagreb, 2013.
- [36] Danko Brezak, Tomislav Staroveški: Regulacija obradnih sustava – Predavanja, FSB, Zagreb, ak. god. 2016./2017.

---

## **PRILOZI**

I. CD-R disc